

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle
infrastrutture (DIATI)

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Aspetti di interoperabilità nella digitalizzazione di
infrastrutture esistenti con metodologia BIM:
il caso studio del ponte Balbis di Torino**



Relatori:

Prof. Ing. Orazio Baglieri

Prof. Ing. Anna Osello

Correlatori:

Prof. Ing. Paolo Castaldo

Dott.ssa Arianna Fonsati

Candidato:

Giulio Maddaluno

Marzo 2020

Abstract

Oggigiorno, uno dei più grandi ostacoli per lo sviluppo della metodologia BIM nel mondo delle strutture ed infrastrutture è sicuramente la mancanza di interoperabilità tra i software InfraBIM presenti nel mercato. La presente tesi si concentra su questo aspetto ed ha lo scopo di testare l'interoperabilità tra software di modellazione parametrica e software di calcolo strutturale tramite un processo basato sulla metodologia BIM.

In particolare, è stato scelto un caso studio appartenente alla categoria dei ponti presente all'interno dell'archivio storico della società Porcheddu del Politecnico di Torino: il ponte Franco Balbis. Il ponte in questione è stato riprodotto in formato digitale realizzandone il modello con un software BIM a partire dai disegni cartacei reperiti in archivio. Il modello è in grado di riprodurre la geometria di tutte le parti strutturali e non che compongono l'opera. Una volta conclusa la fase di modellazione, è stata svolta un'analisi di interoperabilità tra i software adottati al fine di evidenziare i vantaggi, le criticità e gli strumenti per risolvere eventuali problemi.

Abstract

Nowadays, one of the biggest obstacles to developing the BIM methodology in the world of civil engineering structures and infrastructures is certainly the lack of interoperability between InfraBIM software present in the market. This thesis focuses on this latter aspect and it has the purpose to test the interoperability between software for parametric modeling and software for structural analysis through a process based on BIM methodology.

In order to do this, a case study belonging to the category of bridges and present inside the historical archive of the Porcheddu company of the Polytechnic of Turin is chosen: the Franco Balbis' bridge. This bridge is reproduced in digital format by making a model with a BIM software from the paper drawings found in the archive. The model is able to reproduce the geometry of all the structural and non structural parts that make up the infrastructure. Once the modeling's phase has been completed, an interoperability analysis takes place in order to highlight the advantages, the criticism and the tools to solve eventual problems.

Indice

Abstract	.....
Abstract	.....
INTRODUZIONE	.....	1
<u>CAPITOLO 1: METODOLOGIA BIM - INFRABIM</u>	.....
1.1 Metodologia BIM	.....	4
1.2 Metodologia InfraBIM	.....	12
1.3 Panoramica delle normative BIM	.....	16
Europa	.....	16
Italia	.....	19
1.4 BIM & Analisi strutturale	.....	23
<u>CAPITOLO 2: INTEROPERABILITA' & FORMATI</u>	.....
2.1 STRUMENTI BIM - INFRABIM	.....	28
Autodesk - Autodesk Revit	.....	30
Bentley Systems - OpenRoads ConceptStation & OpenRoads Designer	.....	35
2.2 STRUMENTI PER IL CALCOLO STRUTTURALE	.....	37
SAP2000	.....	39
2.3 INTEROPERABILITA'	.....	40
Revit to SAP200: Formato IFC	.....	43
Revit to SAP200: Formato EXR	.....	47

CAPITOLO 3: IL CASO STUDIO: PONTE FRANCO BALBIS.....

3.1	DESCRIZIONE DEL PONTE BALBIS	50
3.2	DOCUMENTAZIONE DI PARTENZA.....	53

CAPITOLO 4: METODOLOGIA INFRABIM APPLICATA AL CASO STUDIO.....

4.1	WORKFLOW METODOLOGICO.....	61
4.2	MODELLAZIONE IN AUTODESK REVIT	64
	Modellazione dei pilastri.....	66
	Modellazione delle travi.....	68
	Modellazione del riempimento impalcato e della pavimentazione.....	70
	Modellazione delle fondazioni.....	72
	Modellazione delle pile.....	73
	Modellazione delle spalle e delle arcate.....	75
	Modellazione dei parapetti.....	77
4.3	Analisi della modellazione InfraBIM	78

CAPITOLO 5: TEST DI INTEROPERABILITA'.....

5.1	IFC	83
	Analisi dei risultati	85
5.2	Direct link: EXR	89
	Analisi dei risultati	90
5.3	Comparazione dei risultati.....	95

CAPITOLO 6: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....

BIBLIOGRAFIA.....

SITOGRAFIA.....

RINGRAZIAMENTI.....

Indice delle figure

Figura 1.1: Metodologia BIM (Biblus-net.com, 2021).....	5
Figura 1.2: LOG applicato ad una parete (Prof. Osello, "BIM e LOD for as-designed, as-built and as-is, 2020).....	7
Figura 1.3: LOI (Prof. Osello, "BIM e LOD for as-designed, as-built and as-is, 2020).....	7
Figura 1.4: LOD (truecadd.com, 2021).....	8
Figura 1.5: La multidimensionalità del BIM (biblus.acca.it, 2021).....	9
Figura 1.6: Vantaggi del BIM (Ing. Coghe, seminario "Il BIM per le infrastrutture", 2020).....	10
Figura 1.7: Curva di MacLeamy (T. Dalla Mora, F. Peron, F. Cappelletti, P. Romagnoni, P. Ruggeri, "Una panoramica sul BIM", AICARR, 2014).....	11
Figura 1.8: Scan to BIM (Eatsman et al., 2018).....	13
Figura 1.9: Utilizzo del BIM in Europa (The Business value of BIM for infrastructure " Dodge Data & Analytics", 2017).....	14
Figura 1.10: BIM per facility management (bimportale.com, 2021).....	15
Figura 1.11: Sviluppo normativa BIM in Europa (The Business value of BIM for infrastructure " Dodge Data & Analytics", 2017).....	17
Figura 1.12: Schema della gestione digitale del processo informativo nelle costruzioni (Bozza Norma UNI 11337, 2014).....	19
Figura 1.13: Applicazione del BIM secondo il DM560 (Bozza Decreto BIM, 2017).....	21
Figura 1.14: Casi studio (Eatsman et al., 2018).....	25

Figura 1.15: Grafico numero di pubblicazioni reltive al BIM / tempo (Tatjana Vilutienė et al. "THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE", 2020).....	25
Figura 2.1: Logo Graphisoft ArchiCAD (Graphisoft.com, 2021).....	28
Figura 2.2: Livello di adozione BIM - software house (National BIM Report, 2020).....	29
Figura 2.3: Logo Autodesk (Autodesk.com, 2021).....	30
Figura 2.4: Logo Revit (Autodesk.com, 2021).....	30
Figura 2.5: Interfaccia Revit (Edil portale.com, 2021).....	31
Figura 2.6: Famiglie di sistema.....	33
Figura 2.7: Famiglie caricabili.....	33
Figura 2.8: Famiglie locali.....	33
Figura 2.9: Gerarchie della classificazione di un oggetto parametrico (Ing. Coghe, seminario "Il BIM per le infrastrutture", 2020).....	34
Figura 2.10: Logo Bentley (bentley.com, 2021).....	35
Figura 2.11: Logo OpenRoads ConceptStation / Designer (bentley.com, 2021).....	35
Figura 2.12: Interfaccia OpenRoads ConceptStation (bentley.com, 2021).....	36
Figura 2.13: Interfaccia OpenRoads Designer (bentley.com, 2021).....	36
Figura 2.14: Logo ROBOT (Autodesk.com, 2021).....	38
Figura 2.15: Logo SAP2000 (csiamerica.com, 2021).....	38
Figura 2.16: Interoperabilità (Ing. Coghe, seminario "Il BIM per le infrastrutture", 2020).....	41
Figura 2.17: Logo buildingSMART (buildingsmart.org, 2021).....	43
Figura 2.18: Gerarchizzazione nel IFC (Manuale per lo standard IFC per Revit, 2014).....	44
Figure 3.1: Localizzazione del ponte Franco Balbis (maps.google.it, 2021).....	50
Figure 3.2: Ponte Balbis - Pavimentazione (Masciarelli, Tesi "La digitalizzazione delle infrastrutture esistenti con metodologia BIM: il caso del ponte Franco Balbis", 2020).....	51

Figure 3.3: Ponte Balbis - Panoramica (Masciarelli, Tesi “La digitalizzazione delle infrastrutture esistenti con metodologia BIM: il caso del ponte Franco Balbis”, 2020).....	52
Figure 3.4: Disegno cartaceo dall'archivio Porcheddu (Archivio Porcheddu-Politecnico di Torino, 2021).....	53
Figura 3.5: Espulsione del copriferro causata dal rigonfiamento di un'armatura ossidata (Città Metropolitana di Torino, 2020).....	54
Figura 3.6: Affioramento di macchie di ruggine (Città Metropolitana di Torino, 2020).....	55
Figure 3.7: Segni di scorrimento tra trave longitudinale e setto frontale della pila (Città Metropolitana di Torino, 2020).....	56
Figura 3.8: Dissesti del parapetto in corrispondenza delle lesioni del timpano (Città Metropolitana di Torino, 2020).....	57
Figura 3.9: Sbrecciature per compressione del coronamento in pietra (Città Metropolitana di Torino, 2020).....	57
Figura 3.10: Modello utilizzato per lo studio dello stato di fatto e del processo fessurativo (Città Metropolitana di Torino, 2020).....	58
Figura 4.1: Workflow.....	63
Figura 4.2: Posizionamento dei livelli di riferimento.....	65
Figura 4.3: Posizionamento delle griglie.....	65
Figura 4.4: Proprietà pilastro.....	66
Figura 4.5: Modello fisico - disposizione dei pilastri.....	67
Figura 4.6: Modello analitico - disposizione dei pilastri.....	67
Figura 4.7: Proprietà trave.....	68
Figura 4.8: Modello fisico - disposizione delle travi.....	68
Figura 4.9: Modello analitico - disposizione delle travi.....	69
Figura 4.10: Proprietà pavimentazione.....	70
Figura 4.11: Modello fisico - pavimentazione e riempimento.....	70
Figura 4.12: Proprietà fondazione.....	72

Figura 4.12: Modello fisico - fondazioni.....	72
Figura 4.13: Proprietà pile.....	73
Figura 4.14: Modello fisico - pile.....	73
Figura 4.15: Modello analitico - pile.....	74
Figura 4.16: Modello fisico arcata – Famiglia: Trave strutturale.....	75
Figura 4.17: Modello fisico arcata – Famiglia: Muro strutturale.....	75
Figura 4.18: Modello analitico arcata – Famiglia: Trave strutturale.....	75
Figura 4.19: Modello analitico arcata – Famiglia: Muro strutturale.....	75
Figura 4.22: Proprietà dei parapetti.....	76
Figura 4.23: Modellazione completa - modello fisico.....	76
Figura 4.24: Modellazione completa - modello fisico.....	77
Figura 4.25: Parametri pila.....	78
Figura 4.26: Proprietà materiale.....	78
Figura 4.27: Proprietà meccaniche calcestruzzo gettato in opera.....	79
Figura 4.28: Test modellazione arcata.....	79
Figura 5.1: Export Revit to SAP2000 – Guida IFC.....	83
Figura 5.2: Modello completo – SAP2000 - IFC.....	84
Figura 5.3: Logo BIM Vision (bimvision.eu, 2021).....	84
Figura 5.4: Vista standard – Posizione elementi strutturali.....	85
Figura 5.5: Vista estrusa - Perdita di elementi.....	85
Figura 5.5: Materiale.....	85
Figura 5.6: Proprietà pilastri.....	86
Figura 5.7: Export Revit to SAP2000 – Guida EXR.....	89
Figura 5.8: Modello completo – SAP2000 - EXR.....	89
Figura 5.9: Modello analitico – Revit.....	90
Figura 5.10: Modello strutturale – SAP2000.....	90
Figura 5.11: Vista standard - Posizione elementi strutturali.....	91
Figura 5.12: Vista estrusa - pila.....	91
Figura 5.13: Export arcata - Famiglia: Trave strutturale.....	92

Figura 5.14: Export arcata - Famiglia: Muro strutturale.....	92
Figura 5.15: Export spalla - Famiglia: Muro strutturale.....	93
Figura 5.16: Materiale.....	93
Figura 5.17: Proprietà.....	94

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Astratto del manuale CSI - IFC (Manuale "Technical note IFC4 import and export", 2014).....	46
Tabella 2.2: Astratto del manuale CSI - EXR (Manuale "CSIXRevit 2021", 2021).....	48
Tabella 3.1: Caratteristiche meccaniche.....	58
Tabella 5.1: Test arcata.....	88
Tabella 5.2: Test pila - categoria Revit: Pilastro strutturale metrico.....	88
Tabella 5.1: Tabella riassuntiva – IFC.....	96
Tabella 5.2: Tabella riassuntiva - EXR.....	97

INTRODUZIONE

Lo scopo di questa tesi è di creare un modello BIM che contenga tutte le informazioni utili, architettoniche e strutturali, al fine di creare un modello digitale idoneo per l'analisi strutturale con un software di calcolo agli elementi finiti. A tal fine le potenzialità dell'interoperabilità tra questi due programmi sono state testate.

Il BIM (Building Information Modeling) è un sistema complesso di procedure e tecnologie per la gestione dei processi edilizi, esso consente di rappresentare in formato digitale le opere nel settore AEC (Architecture, Engineering, Construction) mediante modellazione parametrica degli oggetti, ovvero tramite parametri e regole che ne determinano la geometria, le proprietà e le caratteristiche non geometriche degli oggetti stessi. I vantaggi che si possono riscontrare nell'utilizzo del BIM sono molteplici rispetto alla tradizionale progettazione CAD (Computer Aided Drafting) 2D o alle prassi basate su documenti cartacei, come ad esempio, la riduzione dei tempi e dei costi di progettazione e costruzione, l'aumento della complessità dei progetti, il miglioramento delle performance dell'edificio...

Originariamente, il BIM è stato introdotto per le attività riguardanti il settore delle costruzioni edili, ma le prospettive future mirano al suo utilizzo anche nel campo delle opere civili ed in particolare per la progettazione, costruzione e gestione delle infrastrutture e si parla, dunque di InfraBIM (Infrastructure Building Information Modeling). La trasformazione dell'infrastruttura in modelli digitali coinvolge molteplici aspetti dovuti alla partecipazione di molte discipline del mondo dell'ingegneria (strutturale, impiantistica, idraulica, architettonica, etc...), sia nella fase progettuale sia durante la successiva fase di realizzazione, questa multidisciplinarietà richiede il trattamento dei dati in formati differenti. Ad oggi, la metodologia InfraBIM non è ancora molto evoluta, soprattutto in ambito strutturale è un tema ancora in fase di sviluppo da parte dei professionisti del settore.

Il ponte utilizzato come caso studio è il ponte Franco Balbis situato a Torino. Dalla documentazione fornita dalla Città Metropolitana di Torino è stato possibile realizzare un modello BIM tramite il software *Autodesk Revit 2021*, tale che il modello fisico e quello analitico siano il più efficiente possibile, il primo mira a ottenere un modello verosimile allo stato di fatto, il secondo a schematizzare la struttura con una serie di nodi e aste. Per la successiva analisi agli elementi finiti si è utilizzato *SAP2000* e si è affrontato il tema principale della tesi, l'interoperabilità tra programmi BIM e programmi di calcolo strutturale, in particolare si è trattato sia l'uso di formati di scambio standard che l'esistenza di plug-in e si è scelta la soluzione migliore dal punto

di vista dell'interoperabilità e dell'efficienza. Prima dell'avvio dell'analisi strutturale, risultano necessari una serie di operazioni di verifica e perfezionamento del modello strutturale in *SAP2000* al fine di superare le criticità legate allo scambio dei dati, che però non sono state oggetto della presente tesi.

La tesi è stata divisa in diversi capitoli, ognuno dei quali è stato suddiviso in base alle tematiche principali. Il **primo capitolo** fornisce informazioni di base sui concetti, sulle tecnologie e sulle normative per il BIM e vengono descritti molti dei vantaggi potenziali che è possibile aspettarsi. Nel **secondo capitolo** vengono affrontati i complicati aspetti dell'interoperabilità, tra cui i metodi utilizzati per condividere le informazioni tra i vari software. Il **terzo capitolo** descrive il ponte preso come caso studio e la documentazione di partenza utile per la creazione del modello digitale. Il **capitolo quattro** evidenzia come sono stati modellati i diversi elementi che compongono il ponte, andando ad evidenziare i vantaggi e le problematiche che sono stati riscontrati. Il **capitolo cinque** evidenzia i limiti dell'interoperabilità riscontrati e le correzioni che risultano necessaria al modello al fine di poter effettuare un'analisi strutturale. Nel **capitolo sei** vengono fornite le conclusioni e gli sviluppi futuri.

Capitolo 1

METODOLOGIA BIM - INFRABIM

METODOLOGIA BIM - INFRABIM

1.1 Metodologia BIM

Il manuale *“Il disegno e l’ingegnere”* (Osello A., 2020) fornisce una spiegazione molto chiara e precisa su quanto concerne le nuove tecnologie BIM, di seguito verranno trattate le principali tematiche connesse a tale tecnologia in modo da fornire un quadro completo.

Nel settore AEC, i disegni tecnici sono utilizzati per comunicare dati grafici di edifici (case, scuole, ospedali...) e di infrastrutture (strade, ferrovie, aeroporti, ponti...), oggi, con la nascita del BIM, i disegni tecnici sono cambiati, in quanto esso permette di arricchire la rappresentazione grafica con dati alfanumerici, nello stesso database BIM. Inoltre, i disegni tecnici permettono di descrivere il progetto attraverso diversi documenti, mentre un modello 3D parametrico è un unico modello virtuale che permette di generare i disegni e la documentazione per il progetto in questione.

In aggiunta, il BIM permette agli attori coinvolti nel processo di costruzione di condividere informazioni / idee di progetto attraverso l’interoperabilità, estraendo e riempiendo i dati del modello 3D parametrico che risulta essere continuamente aggiornato, questa operazione può essere svolta utilizzando diverse strategie e vari formati di scambio.

Con il termine BIM non ci si riferisce ad uno strumento di progettazione, bensì ad un processo che utilizza uno o più modelli contenenti tutte le informazioni che riguardano l'intero ciclo di vita di un'opera: dal progetto alla costruzione, fino alla sua demolizione e dismissione. Grazie alla metodologia BIM, l'edificio viene "costruito" prima della sua realizzazione fisica mediante un modello virtuale e attraverso la collaborazione di tutti i professionisti coinvolti nel progetto. Tuttavia, ad oggi, non vi è una definizione univoca di BIM, ma in Europa si sta lavorando ad una norma che standardizzi le definizioni. La più recente e ufficialmente riconosciuta è: *“use of shared digital representation of a built object (including buildings, bridges, roads, process plants, etc.) to facilitate design, construction and operation processes to form a reliable basis for decisions”* (ISO 29481-1;2016). Una seconda definizione è quella della National Building Information Model Standard Project Committee: *“il BIM è una nuova metodologia per la rappresentazione computabile delle caratteristiche fisiche e funzionali di una*

struttura e delle sue informazioni relative al ciclo di vita previsto utilizzando standard aperti per il processo decisionale d'impresa rivolto alla migliore profittabilità” (NBIMS; 2018). Un'altra definizione è data da Eatsman et al., nel 2008 nel “BIM Handbook”, dove il BIM è descritto come: “*a verb or adjective phrase to describe tools, processes, and technologies that are facilitated by digital, machine readable documentation about a building and its performance, design, construction and operation*” (Eatsman et al; 2018).

Da queste definizioni, si può evincere un errore comune, ovvero quello di intendere il BIM come un insieme di software capaci di creare un modello. Mentre, un modo più appropriato è che il BIM si riferisce ad una metodologia di integrazione di tutti i professionisti coinvolti nel processo di costruzione (architetti, ingegneri, disegnatori..) andando a creare una condivisione delle informazioni tra loro attraverso una rappresentazione di “*both the physical and intrinsic properties of the building as an object-oriented model tied to a database*” (Quirk, 2012).

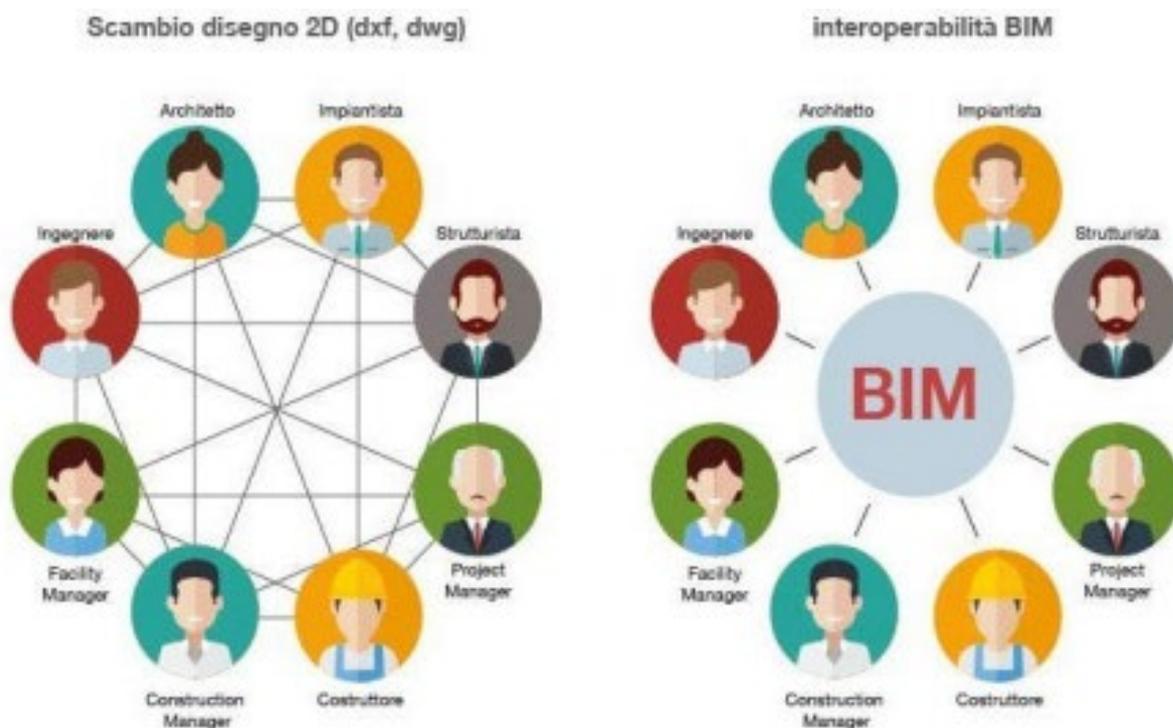


Figura 19.1: Metodologia BIM

La metodologia BIM nasce come un'evoluzione della modellazione 3D, aggiungendo ai dati geometrici altre informazioni di diversa natura, in modo da avere un modello parametrico. In questo modo è possibile verificare e risolvere problemi di interazione tra le parti, automatizzare alcune operazioni, come ad esempio l'inserimento e lo spostamento delle finestre all'interno delle pareti, ordinare gli oggetti in base alle loro proprietà, estrarre quantità, con la possibilità di interfacciarsi con altri software senza la perdita di informazioni. Non è solamente un cambiamento del modo di disegnare, come in passato lo era stato con l'avvento

del CAD, bensì una vera e propria rivoluzione nel modo di progettare, che coinvolge sia l'intero processo di progettazione e costruzione sia tutti gli attori coinvolti.

Quindi, utilizzando una metodologia BIM, alla classica rappresentazione fisica di un elemento possono essere aggiunte altre informazioni, e grazie a questi dati è possibile definire diverse tipologie di oggetti, come travi, pilastri, platee, muri, porte, finestre e molti altri che è possibile aggiungere nella libreria del software (che contiene un certo numero di elementi definiti e variabile per i diversi programmi). Inoltre, è possibile estrarre dal modello BIM, in maniera automatica, sezioni, prospetti e disegni, senza la necessità di rifare in parte o del tutto il lavoro.

In particolare, la metodologia BIM è basata sulla modellazione parametrica, in cui gli oggetti non sono rappresentati con geometria e proprietà fisse, ma tramite parametri e regole, che ne determinano la geometria, le proprietà e le caratteristiche non geometriche. I parametri e le regole possono essere costituiti da espressioni che si relazionano ad altri oggetti, in modo da consentire un aggiornamento automatico controllato dall'utente o realizzato a fronte di variazioni del contesto. Spesso all'interno della piattaforma BIM sono definiti degli oggetti parametrici di base che gli utenti possono integrare, modificare o ampliare. Ogni oggetto parametrico presenta un comportamento (behaviour) che consente il suo aggiornamento automatico in relazione al contesto in cui esso viene inserito. Il progettista definisce inizialmente una categoria o una famiglia di elementi che costituiscono una sorta di combinazione di geometrie fisse e parametriche, ovvero un insieme di parametri e regole che ne consentono di controllare i parametri, grazie ai quali è poi possibile generare gli elementi delle istanze, ossia gli oggetti specifici di interesse particolare. Un concetto fondamentale nella metodologia BIM è il “**Level of Development**” (Livello di Sviluppo) indicato con l'acronimo **LOD**. Esso viene introdotto nel 2004 dalla *Vico Software* (oggi *Trimble*). Il LOD descrive i minimi dimensionali, spaziali, quantitativi, qualitativi e altri dati che possono essere inseriti in un elemento del modello per sostenere gli usi autorizzati associati a tale LOD. L'espressione “Livello di sviluppo” è la più ampia possibile, è secondo la *UNI 11337 – 4*, è data dall'unione di “LOG” e “LOI” che comprendono sia gli aspetti grafici che non grafici e si basano su diversi sistemi di classificazione a livelli che possono differire a seconda della normativa adottata.

- LOD 500: è legato all'As Built (come realizzato), ed ogni elemento inserito nel modello è la rappresentazione reale e verificata di ciò che è presente in cantiere in termini di forma, dimensioni, posizione e orientamento.

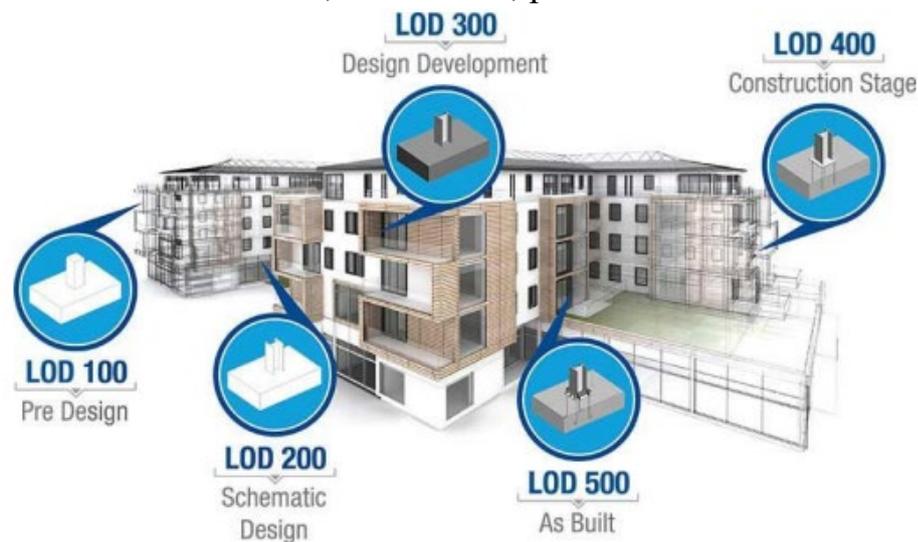


Figura 1.4: LOD

Proprio sul fronte della gestione informativa dei dati il BIM sta affrontando un ulteriore salto concettuale e qualitativo, la nuova norma *UNI EN 17412-1:2021*, indica i concetti e i principi per stabilire una metodologia per specificare il Livello di Fabbisogno Informativo (Level of Information Need). L'obiettivo della norma è quello di evitare la gestione di un numero eccessivo di informazioni rispetto a quanto effettivamente necessario e quindi si ha l'introduzione di una metodologia che mira a valutare i contenuti informativi minimi richiesti nel corso dell'evoluzione del procedimento tecnico amministrativo legato al processo di costruzione. Il Livello di Fabbisogno Informativo si differenzia dall'uso tradizionale del LOD, in quanto si basa sulla definizione di quattro requisiti informativi:

- Scopo: spesso è associato al 'BIM Uses' (es: coordinamento, gestione...).
- Tappa fondamentale: quando le informazioni sono richieste (es: fasi progettuali o date specifiche).
- Attori: Chi richiede informazioni (es: committenza) e chi le deve fornire (es: progettista).
- Oggetto: a cosa è associato il Livello di Fabbisogno Informativo. L'oggetto non è solo l'elemento (es: porta, solaio, parete, macchine di cantiere) a cui siamo abituati, ma ha una valenza più ampia includendo anche parti, sistemi (es: sistema di ventilazione) o interi edifici.

Nei requisiti bisogna includere un'appropriata determinazione delle qualità, quantità e della granularità delle informazioni. Nei Livello di Fabbisogno Informativo le informazioni geometriche e alfanumeriche hanno la stessa importanza.

Un modello BIM può contenere qualsiasi informazione riguardante la costruzione edilizia e le sue parti, per questo il BIM non porta alla realizzazione del solo modello tridimensionale per la descrizione geometrica dell'opera, ma permette un aumento del concetto di 'dimensione' del progetto. Infatti, la *norma UNI 11337* prevede la definizione di sette 'dimensioni':

- Progettazione 4D: quando si ha una programmazione e pianificazione temporale. La quarta dimensione del BIM consente ai partecipanti di estrarre e visualizzare il progresso delle attività durante l'intero ciclo di vita della costruzione, ciò permette di ridurre le interferenze durante le fasi di sviluppo del progetto.
- Progettazione 5D: quando si ha una stima e analisi dei costi. Essa quando è associata al modello BIM 4D permette di visualizzare l'andamento dei costi nel tempo. Comprende i computi, gli estimi e le valutazioni.
- Progettazione 6D: è utilizzata per la gestione operativa e per la manutenzione dell'edificio e delle sue componenti per l'intero ciclo di vita. L'utilizzo della tecnologia BIM-6D comporta una gestione più semplice ed efficiente, soprattutto in riferimento alla sostituzione e/o manutenzione delle parti costituenti l'edificio, avendo a disposizione una quantità elevate di informazioni utili.
- Progettazione 7D: quando si ha un'analisi e simulazione delle prestazioni. L'utilizzo della tecnologia BIM-7D può determinare stime energetiche più complete e accurate di quelle stimate nella precedente fase di progettazione. Permette, inoltre, di misurare, verificare e migliorare i processi per raccogliere informazioni sulle prestazioni delle strutture. Comprende quindi aspetti di sostenibilità sociale, economica ed ambientale.



Figura 1 5: La multidimensionalità del BIM

A seguito di queste considerazioni, uno dei grandi vantaggi che offre un progetto BIM, a differenza di un progetto in CAD è dato dal suo utilizzo per la manutenzione. Il BIM dà la possibilità alla committenza di avere un monitoraggio costante dello stato delle strutture ed infrastrutture anche dopo la fase di progettazione; in questo modo è più semplice monitorare il degrado dei materiali e programmare meglio la manutenzione.

L'immagine seguente sintetizza i principale vantaggi dell'utilizzo di una metodologia BIM, i quali sono stati ampiamente discussi in questo capitolo.



Figura 1.6: Vantaggi del BIM

Queste considerazioni traducono in pratica quello che MacLeamy aveva sottolineato nel 2004, infatti è possibile evidenziare come varia lo sforzo progettuale in funzione delle fasi della lavorazione, a seconda che si adotti un processo di progettazione tradizione o un processo di progettazione integrato, quale il BIM.

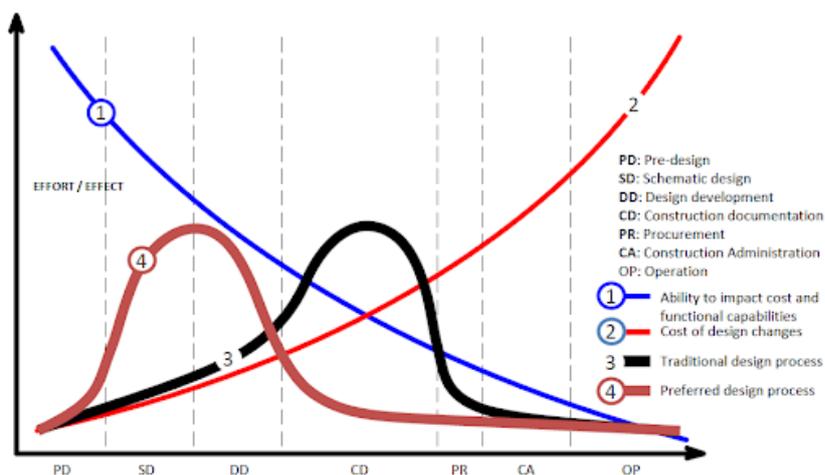


Figura 1.17: Curva di MacLeamy

Le curve evidenziano come lo sforzo progettuale concentrato nelle fasi iniziali della progettazione (tipico di un approccio integrato) incida in maniera positiva in termini di costi (riduzione), a fronte di quello che abitualmente constatiamo nella realtà, dove il tradizionale processo vede l'ultimazione e il perfezionamento del progetto in fasi più avanzate con costi decisamente maggiori. Inoltre, è possibile notare che non si tratta di una riduzione gli "sforzi" progettuali, in quanto l'impegno non può che essere commisurato alla qualità di ciò che si intende realizzare (i punti di massimo delle due curve rappresentative dei processi BIM-oriented e tradizionale sono infatti pressoché identici), ma di anticipare nel tempo tali sforzi.

1.2 Metodologia InfraBIM

Con il termine InfraBIM (Infrastructure Building Information Modeling) si riferisce a tutti quei processi BIM-based nel campo della progettazione, costruzione e gestione delle infrastrutture (strade, ferrovie, aeroporti, ponti, acquedotti, etc.). Poiché InfraBIM è un acronimo di conio recente nel settore AEC si utilizzano talvolta anche i termini CIM (Civil Information Modeling), Horizontal BIM e Heavy BIM per distinguerlo dal BIM edile per opere puntuali e strutture verticali. Di seguito verranno proposte alcune definizioni al fine di sottolineare le distinzioni tra le applicazioni del BIM, comunque nel prosieguo della trattazione si preferirà l'impiego del termine InfraBIM.

Una definizione di Civil Information Modeling (CIM) è proposta da Cheng nel 2016, in cui esso viene descritto come “...*a term commonly used in the AEC industry to refer to the application of BIM for civil infrastructure facilities...*” (Cheng; 2016)

Mentre, una definizione di Horizontal BIM è data da Dell'Acqua, Guerra de Oliveira, & Biancardo, in cui è descritto come: “..*Horizontal (transportation) construction relays on GIS data due to the length of the construction objects such as railway, roads, tunnels, etc...*” (Dell'Acqua et al.; 2018)

Al fine di presentare le tematiche connesse all'InfraBIM si è preso come riferimento l'articolo “*BIM APPLICATION IN INFRASTRUCTURE PROJECTS*” pubblicato nel “*THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE ENGINEERING*”.

Le infrastrutture sono opere di grandi dimensioni, richiedono investimenti di ingenti capitali e coinvolgono differenti figure che cooperano allo stesso progetto; è quindi essenziale gestire in maniera integrata tutte le analisi e informazioni inerenti al processo costruttivo. Per questo, sebbene la metodologia BIM nasce per trovare soluzioni nel campo dell'ingegneria edile, essa si sta diffondendo in modo consistente anche nel campo delle infrastrutture, questo sviluppo è favorito anche dalle normative, le quali impongono un processo di progettazione BIM per le opere a forte impatto sociale ed economico, quali appunto le infrastrutture.

La piattaforma BIM authoring permette la generazione di un modello digitale informativo dell'infrastruttura, comprensivo di ulteriori elementi di dettaglio come, stratigrafia delle sovrastrutture e dei sottofondi, fossi, cunette, reti di drenaggio delle acque di piattaforma, impianti speciali, opere complementari, etc. Inoltre, la piattaforma BIM assicura la possibilità di estrarre dal modello le planimetrie, i profili longitudinali e le sezioni trasversali. Gli elaborati possono essere dinamicamente aggiornati a seguito di eventuali modifiche apportate al modello per interventi di adeguamento e/o manutenzione straordinaria dell'infrastruttura.

Come nel caso della metodologia BIM, anche in campo infrastrutturale si può estendere il concetto di ‘dimensione’, all’analisi dei tempi (InfraBIM 4D), alla gestione dei costi (InfraBIM 5D) e infine alla gestione della manutenzione stradale (BIM 6D).

In questo ambito nel nostro Paese, un processo che si sta affermando è quello della digitalizzazione delle opere viarie al fine di recuperare il patrimonio esistente. Questo processo consiste nell’acquisizione delle caratteristiche geometriche delle strade esistenti, al fine di generare modelli implementabili e fruibili in piattaforme BIM. Tale processo è noto come *reverse engineering*, o **Scan to BIM**. La geometria viene generata mediante point clouds, derivati da procedure di scanning. Ad oggi, tale tecnica risulta essere scarsamente automatizzata e deve essere utilizzata da tecnici esperti in grado di monitorare dati interoperabili.



Figura 1.8: Scan to BIM

D’altra parte, è importante considerare che il processo costruttivo di un’infrastruttura è molto complesso, in quanto vi sono molti aspetti da considerare in termini ingegneristici e ad oggi ne risulta che l’infrastruttura non può essere rappresentata solamente con un software BIM. Sicuramente, adottare una soluzione di questo tipo porterebbe notevoli benefici, il problema è quello di definire un set di operazioni adattabile ad ogni infrastruttura.

A tal riguardo, considerando l’importanza delle infrastrutture in termini economici e quantitativi (nei paesi sviluppati e industrializzati, le infrastrutture rappresentano circa il 35-40% di tutte le opere pubbliche presenti nel territorio) è evidente come esista un’importante lacuna nello sviluppo di software BIM per le infrastrutture che le software-house dovrebbero affrontare. Un problema principale per i progettisti è legato all’interoperabilità tra i vari formati (concetto già introdotto nei paragrafi precedenti e che si discuterà meglio in seguito), dal quale deriva una scarsa comunicazione tra tutti i vari soggetti che lavorano al progetto. A tal proposito, va ricordato che le diverse software-house cercano di produrre file nel loro formato proprietario, causando problemi ai progettisti, che per diversi motivi, usano software diversi. Dal punto di vista della committenza, invece, l’ostacolo primario risulta essere ancora oggi la mancanza di formazione del personale. D’altro canto, gli appaltatori, che nel caso delle infrastrutture di trasporto sono quasi sempre enti pubblici, spingono verso l’adozione di una metodologia InfraBIM, in quanto essa permette di avere documenti progettuali più accurati, una migliore comunicazione

tra i progettisti, riduzione dei tempi necessari alla stesura e alla progettazione e mirare a nuove aree di mercato verso i paesi esteri (in cui il BIM ha raggiunto uno stadio più avanzato). Quindi, è evidente come da un lato gli appaltatori cerchino di migliorare la capacità relativa alla fabbricazione digitale per renderla un vantaggio efficace, mentre dall'altro lato le committenze sentano i benefici derivanti direttamente dal BIM.

In conclusione, in Italia la metodologia InfraBIM non è ampiamente diffusa come nel settore edilizio, inoltre non è ancora disponibile uno stato dell'arte che analizzi le applicazioni BIM nel campo infrastrutturale.

L'utilizzo del BIM per le infrastrutture nello scenario mondiale ed europeo è invece diverso. Diversi studi evidenziano come molte aziende e professionisti lo utilizzino per la creazione dei loro modelli e come questo verrà impiegato sempre maggiormente con il passare degli anni grazie all'implementazione degli strumenti.

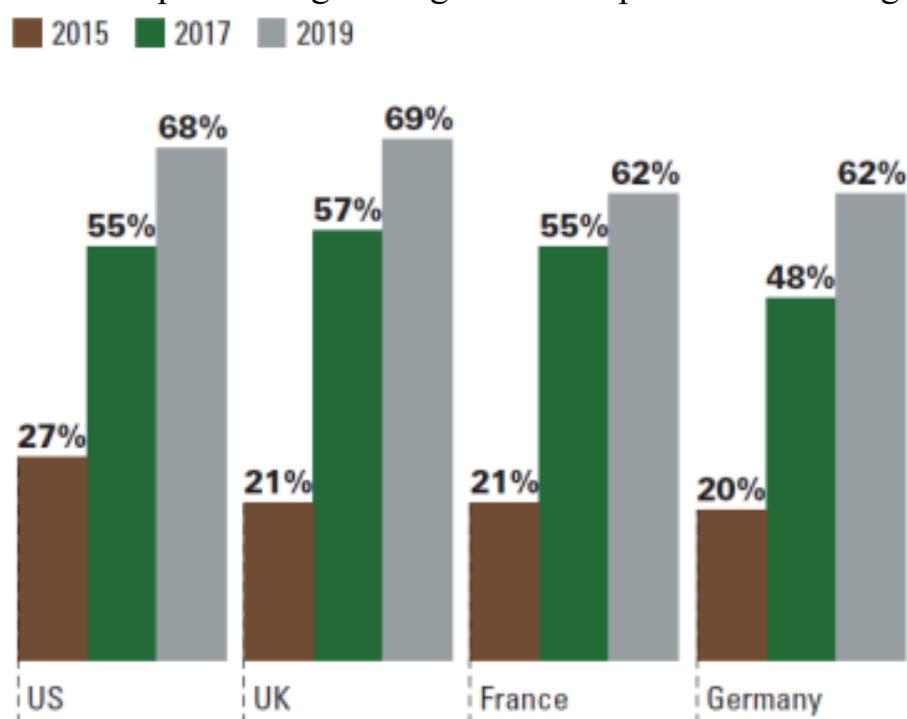


Figura 1.9: Utilizzo del BIM in Europa

Durante la fase di modellazione è importante specificare anche il tipo di “*InfraBIM use*” che si sta adoperando. Il termine indica “*uno dei modi di utilizzare il BIM durante il ciclo di vita di un’opera per il raggiungimento di uno o più obiettivi*” (Kreider et al.; 2016) e venne introdotto per la prima volta da Kreider et al. negli USA riferendosi non al campo infrastrutturale ma al campo edile. Esempi di “*InfraBIM uses*” sono le analisi strutturali, la programmazione 4D, la stima dei costi 5D, il controllo del progetto ecc. ecc.

A tal proposito, il BIM, ad oggi, esprime a pieno il suo potenziale per quanto riguarda l’aspetto della manutenzione dell’opera, o “*facility management*”, il quale è un tema molto sentito da parte della committenza per via del notevole impatto

economico che questa ha sull'opera, soprattutto quando questa diventa straordinaria e non pianificata in anticipo. Infatti, nel settore del facility management i software propri dell'ingegneria edile, con opportune accortezze, risultano essere adattabili alle grandi infrastrutture. Ciò, invece, non risulta possibile nel settore della progettazione, dal momento che le differenze tra la progettazione di un'opera edile e quella di un'infrastruttura, sono molto rilevanti sia in termini di normativa sia in termini di progettazione stessa.

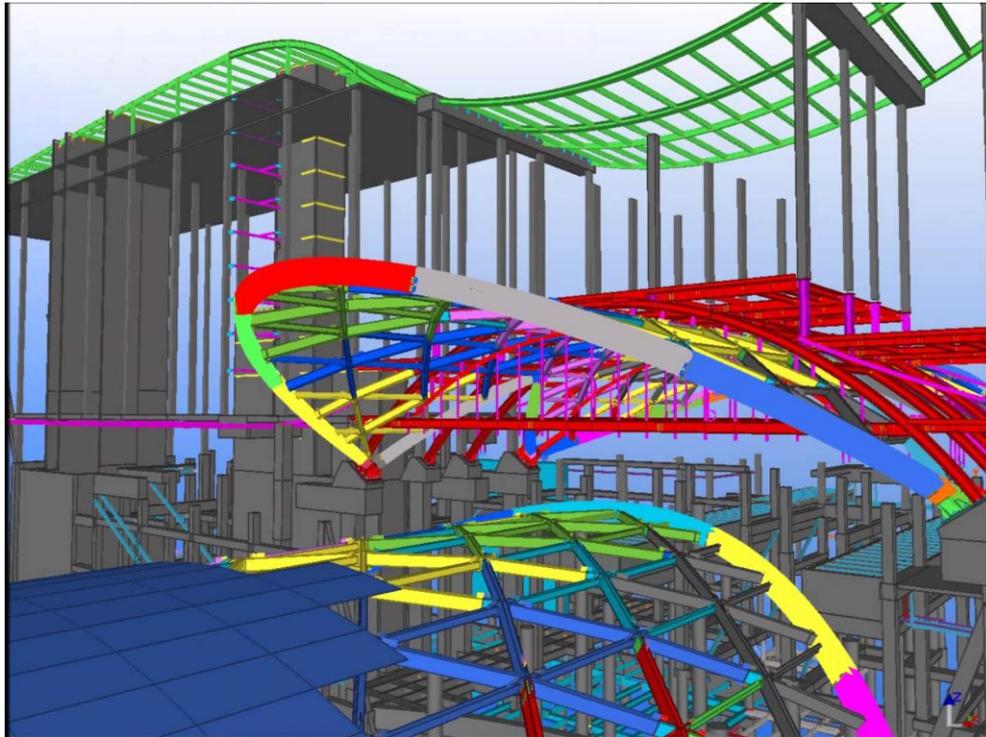


Figura 1.10: BIM per facility management

1.3 Panoramica delle normative BIM

Europa

L'Unione Europea fornisce un riferimento molto chiaro e preciso su quanto concerne l'introduzione delle nuove tecnologie BIM. La normativa in materia fa capo alla **Direttiva Europea 2014/24/UE** sugli appalti pubblici votata dal Parlamento Europeo nel Gennaio 2014 ed entrata in vigore il 26 febbraio 2014. La Direttiva emanata vincola gli Stati membri a *“incoraggiare, specificare o imporre”* l'impiego del BIM tramite provvedimenti legislativi, con lo scopo d'introdurre l'utilizzo nella progettazione e realizzazione di tutti i lavori a finanziamento pubblico. Le disposizioni emanate fissano un periodo di trenta mesi per il recepimento delle indicazioni indicate: pena, in caso di non conseguimento degli obiettivi stabiliti, di sanzioni ai singoli Stati membri. Nelle linee guida non vengono indicati espressamente i software da utilizzare per conformarsi ai risultati previsti dalla direttiva, ma solo le metodologie di gestione e verifica delle informazioni, annesse al processo edilizio. Il documento lascia ai singoli Stati carta bianca in merito alla scelta degli strumenti da utilizzare, la normativa all'Articolo 22 comma 4 dichiara esplicitamente che: *“Per gli appalti di lavori e i concorsi di progettazione, gli Stati membri possono richiedere l'uso di strumenti elettronici specifici, quali gli strumenti di simulazione elettronica per le informazioni edilizie o strumenti analoghi”*. Sebbene l'UE dia delle indicazioni precise in merito agli obiettivi da conseguire, lascia anche ai suoi membri la possibilità di legiferare autonomamente in merito. In tal modo ogni Paese è in grado di adottare le scelte consone, in base alle normative statali vigenti al grado di sviluppo della metodologia usata in un determinato contesto. Stati come Gran Bretagna, Finlandia, Norvegia, Danimarca, che sono notoriamente più sviluppati sotto questo aspetto, vantano una normativa vigente, già prima della Direttiva Europea attualmente in corso.

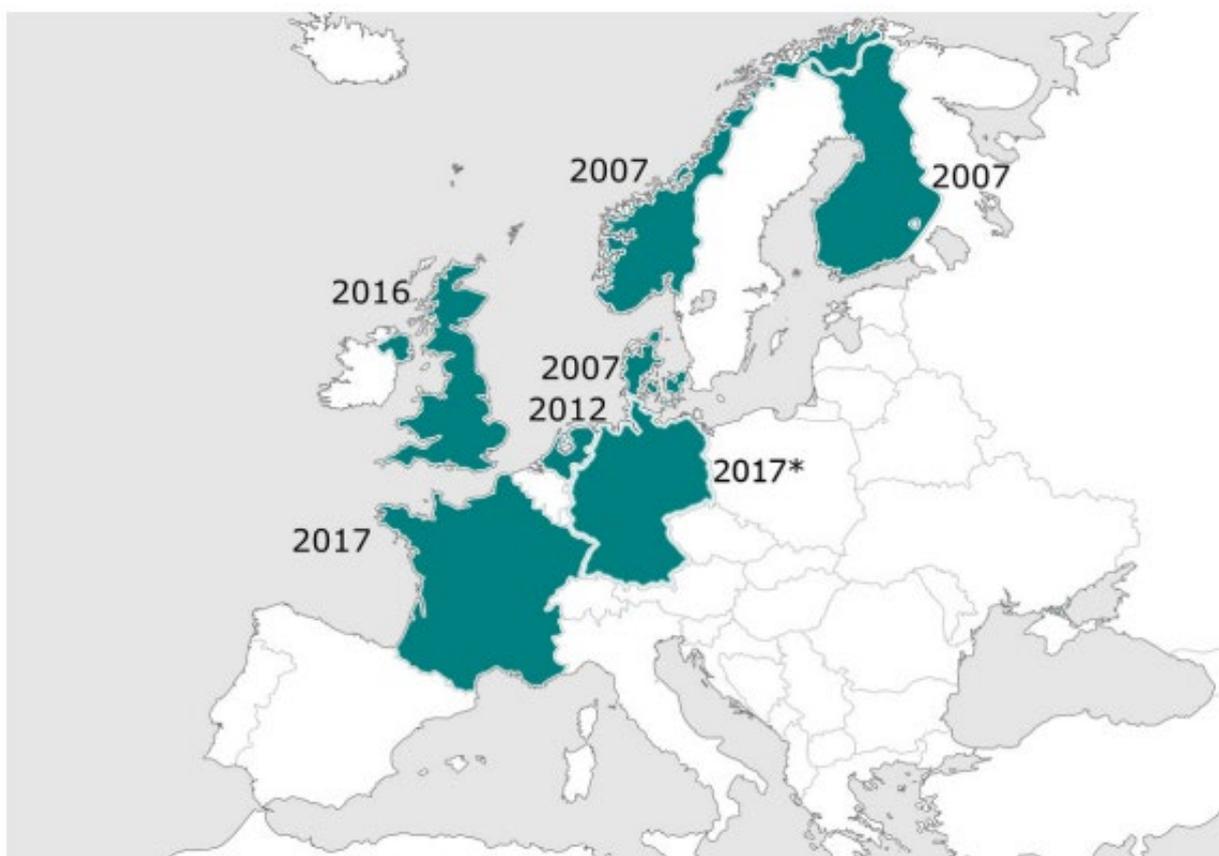


Figura 1.11: Sviluppo normativa BIM in Europa

La Direttiva include anche altri Articoli che evidenziano l'importanza dell'utilizzo degli strumenti e della metodologia BIM nei lavori pubblici. Nell'Art. 52 è dichiarato che: *“I mezzi elettronici di informazione e comunicazione possono semplificare la pubblicazione degli appalti e accrescere l'efficacia e la trasparenza delle procedure di appalto. Dovrebbero diventare la norma per la comunicazione e lo scambio di informazioni nel corso delle procedure di appalto [...]”*. L'UE in questo incoraggia vivamente sull'utilizzo delle nuove tecnologie per meglio gestire lo scambio delle informazioni degli appalti pubblici, al fine di semplificare e rendere interamente trasparente l'iter che sta dietro al processo edilizio. Logicamente l'obiettivo dell'Unione Europea è quello di gettare le basi per una normativa univoca a tutti gli Stati membri nell'ambito degli appalti pubblici. Questo indurrebbe al conseguimento di un maggiore contenimento ai costi dei progetti edili finanziati con fondi pubblici, e ad un potenziamento di competitività sul mercato europeo nell'aggiudicarsi contratti edili internazionali.

Un'altra norma relativa al Building Information Modelling è la **UNI EN ISO 19650:2019**, la quale è composta da due parti: la prima parte è relativa ai concetti e ai principi per la gestione delle informazioni, la seconda specifica i requisiti per la gestione delle informazioni nella fase di consegna dei cespiti immobili. In particolare, la norma mette a disposizione raccomandazioni inerenti a un quadro concettuale per la gestione delle informazioni, che includa, lo scambio, la

registrazione, l'aggiornamento e l'organizzazione per tutti gli attori. Essa è applicabile all'intero ciclo di vita di un cespite immobile, compresa la pianificazione strategica, la progettazione iniziale, l'ingegnerizzazione, lo sviluppo, la predisposizione della documentazione per gli affidamenti e la costruzione, il funzionamento operativo quotidiano, la manutenzione, la ristrutturazione, la riparazione e la fine del ciclo di vita. La seconda parte entra in dettaglio all'interno del processo informativo, occupandosi dei protagonisti e precisandone la collocazione all'interno della filiera di processo e i relativi ruoli e funzioni.

Italia

Le fondamenta legislative sul tema BIM, che per prime hanno dato le linee guida al settore, possiamo attribuirle all'Ente Italiano di Normazione (UNI) che ha scritto la primissima norma italiana sulla gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. L'incarico fu affidato nel 2014 al gruppo di lavoro UNI/CT033-GL05 (Codificazione dei prodotti e processi in edilizia) con il compito di redigere una norma tecnica riguardante l'applicazione della metodologia BIM all'interno dei confini nazionali. La **Norma UNI 11337** denominata “**Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni**” è suddivisa in una serie di “parti” che spiegano in modo accurato tutta la procedura da seguire per utilizzare la metodologia in maniera corretta. La norma è suddivisa in 8 parti:

- Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi.
- Parte 2: Criteri di denominazione e classificazione di modelli, prodotti e processi.
- Parte 3: Modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell'informazioni tecniche per i prodotti da costruzione (Schede informative digitali per prodotti e processi).
- Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati ed oggetti.
- Parte 5: Flussi informativi nei processi digitalizzati.
- Parte 6: Linea Guida per la redazione del capitolato informativo.
- Parte 7: Requisiti di conoscenza, abilità e competenza per le figure coinvolte nella gestione digitale dei processi informativi.
- Parte 8: Organizzazione delle figure coinvolte nella gestione digitale dei processi informativi.

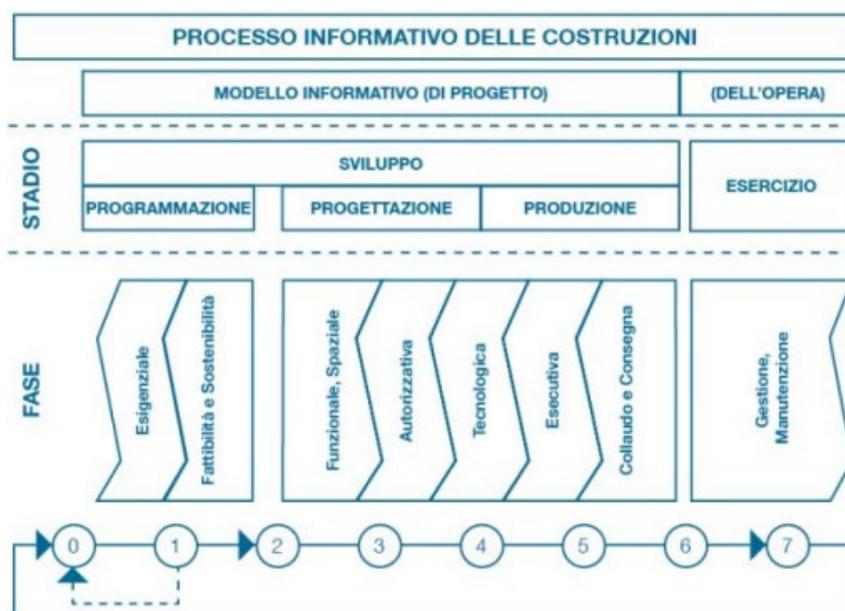


Figura 1.12: Schema della gestione digitale del processo informativo nelle costruzioni

In Italia come già spiegato in precedenza, la stesura della normativa riguardante l'utilizzo del Building Information Modeling nel campo degli appalti pubblici, è stata cosa alquanto controversa e dibattuta, si è cercato di avanzare in maniera cauta e ragionata per tentare di evitare intoppi ed errori. Nonostante la lunga attesa, il 18 aprile 2016 il Consiglio dei Ministri ha approvato il testo unico del Nuovo Codice Appalti, dando così inizio al cosiddetto **Decreto Legislativo 50/2016**.

Il passaggio fondamentale per la stesura della Normativa Nazionale, è stato il provvedimento firmato l'1 dicembre 2017 dal Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti (G. Delrio). Nel decreto emanato, si disciplina l'obbligo di bandire le gare d'appalto e di progettare le opere pubbliche mediante l'utilizzo del BIM, in particolare vengono definiti i tempi e le modalità, della progressiva introduzione da parte delle stazioni appaltanti e delle amministrazioni concedenti. Inizialmente, con l'entrata in vigore del Decreto Legge era stata prevista l'introduzione obbligatoria per le gare d'appalto e di progettazione di opere pubbliche. Successivamente, in seguito ad accurate analisi si è deciso di optare per un periodo di prova da utilizzare a descrizione del progettista, escludendo i casi in cui la committenza lo richieda esplicitamente. L'obbligatorietà dell'utilizzo dei metodi e degli strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture, non entrerà in vigore fino al'1 gennaio del 2019 dando così spazio a una graduale introduzione della novità. Nel **Decreto BIM DM560** dell'1 dicembre 2017 vengono anche definite le varie tempistiche per raggiungere l'obbligatorietà dell'applicazione a tutte le commesse a partire dall'inizio 2025. Seguiranno la seguente tempistica:

- Per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 100 milioni di euro, a decorrere dal 1° gennaio 2019.
- Per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 50 milioni di a decorrere dal 1° gennaio 2020.
- Per i lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 15 milioni di euro a decorrere dal 1° gennaio 2021.
- Per le opere di importo a base di gara pari o superiore alla soglia di cui all'articolo 35 del codice dei contratti pubblici (5,2 milioni di euro), a decorrere dal 1° gennaio 2022.
- Per le opere di importo a base di gara pari o superiore a 1 milione di euro, a decorrere dal 1° gennaio 2023.
- Per le nuove opere di importo a base di gara inferiore a 1 milione di euro, a decorrere dal 1° gennaio 2025.

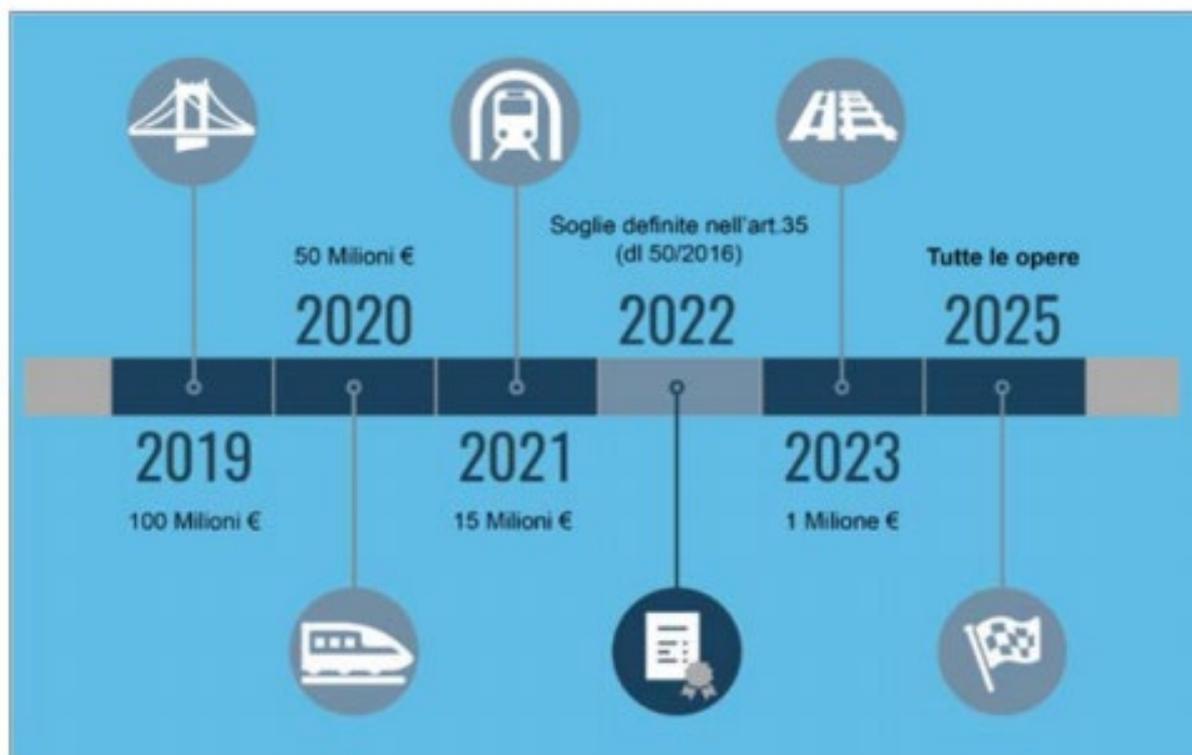


Figura 1.13: Applicazione del BIM secondo il DM560

In particolare, si riportano due commi dell'articolo maggiormente esplicativo che affronta il tema della metodologia BIM.

Il primo è il *comma 1* dell'articolo 23 del suddetto decreto, riguarda i livelli di progettazione per gli appalti, per la concessione dei lavori nonché per i servizi e cita quanto segue: *“La progettazione in materia di lavori pubblici si articola, secondo tre livelli di successivi approfondimenti tecnici, in progetto di fattibilità tecnica ed economica, progetto definitivo e progetto esecutivo ed è intesa ad assicurare: [...]*

h) la razionalizzazione delle attività di progettazione e delle connesse verifiche attraverso il progressivo uso di metodi e strumenti elettronici specifici quali quelli di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture”.

Il secondo è il *comma 13* che riporta: *“Le stazioni appaltanti possono richiedere per le nuove opere nonché per interventi di recupero, riqualificazione o varianti, prioritariamente per i lavori complessi, l'uso dei metodi e strumenti elettronici specifici di cui al comma 1, lettera h). Tali strumenti utilizzano piattaforme interoperabili a mezzo di formati aperti non proprietari, al fine di non limitare la concorrenza tra i fornitori di tecnologie e il coinvolgimento di specifiche progettualità tra i progettisti. L'uso dei metodi e strumenti elettronici può essere richiesto soltanto dalle stazioni appaltanti dotate di personale adeguatamente formato. Con decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, da adottare entro il 31 luglio 2016, anche avvalendosi di una Commissione appositamente istituita presso il medesimo Ministero, senza oneri aggiuntivi a carico della*

finanza pubblica sono definiti le modalità e i tempi di progressiva introduzione dell'obbligatorietà dei suddetti metodi presso le stazioni appaltanti, le amministrazioni concedenti e gli operatori economici, valutata in relazione alla tipologia delle opere da affidare e della strategia di digitalizzazione delle amministrazioni pubbliche e del settore delle costruzioni. L'utilizzo di tali metodologie costituisce parametro di valutazione dei requisiti premianti di cui all'articolo 38.” Nell'articolo 23 sopra citato, è espresso come l'introduzione degli strumenti elettronici sarà graduale ma obbligatorio. Tuttavia il rimando del comma 1 lettera h, non dà indicazioni specifiche circa le piattaforme che devono essere utilizzate dal professionista, però la normativa è molto chiara sui doveri delle stazioni appaltanti che intendono utilizzarle. In particolare è richiesto massimo impegno sulla formazione e sul monitoraggio da parte della committenza stessa.

La nuova norma **UNI EN 17412-1:2021**, che è entrata in vigore il 14 gennaio 2021 e che recepisce la EN 17412-1:2020, invece, indica i concetti e i principi per stabilire una metodologia per specificare il livello di fabbisogno informativo e la consegna di informazioni in modo coerente quando si utilizza il BIM. I concetti e i principi di questa norma possono portare benefici a tutti i partecipanti del ciclo di vita della costruzione andando a fornire una conoscenza comune del corretto Livello di Fabbisogno Informativo.

1.4 BIM & Analisi strutturale

Ad oggi la diffusione del BIM in Italia si è concentrata prevalentemente nel settore della progettazione architettonica: in questo campo le soluzioni sono sempre più avanzate e quindi ora sufficientemente mature per essere utilizzate in modo altamente professionale. Sono partite solo in tempi più recenti proposte per soluzioni BIM legate ad aspetti strutturali, impiantistici e energetici.

Per quanto riguarda l'ambito strutturale, la maggior parte delle piattaforme BIM è in grado di definire i carichi, le combinazioni di carico, le condizioni di vincolo, le proprietà dei materiali e tutti gli altri dati necessari per l'analisi strutturale, come per i software agli elementi finiti. In particolare, la modellazione strutturale consiste nel "ridurre" la struttura in un modello analitico che sia il più semplice possibile, schematizzando ad esempio gli elementi lineari (travi e pilastri) tramite aste legate a due nodi di estremità. In quest'ottica per garantire la continuità ed una corretta interazione tra gli elementi deve esserci sempre un nodo comune tra gli elementi convergenti. Una definizione di modello analitico è quella proposta da Autodesk, in cui: *"Un modello analitico corrisponde ad una rappresentazione 3D semplificata della descrizione tecnica completa di un modello fisico strutturale. Il modello analitico è costituito da componenti strutturali, geometria, proprietà di materiali e carichi che insieme formano un sistema di progettazione. Il modello analitico di una struttura include una serie di modelli analitici di elementi strutturali, uno per ogni elemento della struttura [...] Il modello viene creato automaticamente durante la generazione del modello fisico e può essere esportato in applicazioni di analisi e progettazione"* (Autodesk; 2021).

Affinché un modello BIM possa essere esportato in software specifici per l'analisi strutturale è necessario che esso presenti un elevato LOD. L'AIA indica come valore soglia un LOD300, quindi un modello che presenta un livello di sviluppo di 300 può assolvere alle esigenze della fase di progettazione.

Il passaggio di informazioni dal software del modello BIM a quello strutturale è un aspetto fondamentale. Operativamente questo passaggio di informazioni avviene tramite formati di scambio. Il formato standard più diffuso è l'IFC (Industry Foundation Classes): è molto completo perché include tutti i dati che possono essere presenti in un progetto, ma questo lo rende anche molto complesso. Questa complessità ha portato ogni produttore di software a valutare il formato IFC secondo una propria visione. Il file di scambio viene letto dal software per il calcolo strutturale ed è il punto di partenza per eseguire le analisi strutturali. Terminata questa operazione è possibile esportare un file (IFC o formati di scambio interno) ed integrarlo nel modello di partenza. Le operazioni di esportazione e importazione all'interno del modello BIM presentano una serie di criticità, legate ai diversi tipi

di approccio della struttura nella modellazione architettonica e strutturale. Il progetto architettonico ha l'esigenza di avere un modello che sia più verosimile possibile, affinché gli elaborati grafici come piante, sezioni e prospetti siano il più vicino possibile alla realtà. La progettazione strutturale da un lato conserva questo criterio, per la produzione dei dettagli costruttivi dei vari elementi strutturali. Ma tuttavia, il modello sul software di calcolo deve rispondere anche ad esigenze legate all'analisi agli elementi finiti che alle volte entrano in contrasto con la verosimiglianza del modello.

Al momento attuale deve essere quindi trovata una strada che possa accontentare le esigenze di entrambi per perfezionare e rendere sempre più efficiente il modello BIM di partenza.

Nella prima fase del lavoro di tesi sono stati analizzate le applicazioni dell'InfraBIM in ambito strutturale, in particolare sono stati analizzati diversi casi studio contenuti nel manuale "*Guida completa al Building Information Modeling per committenti, architetti, ingegneri, gestori immobiliari e imprese*" e nel sito web "*Bimportale*". Tale operazione ha permesso di individuare i vari software BIM e FEM che sono stati adottati e identificare i diversi metodi utilizzati per scambiare dati, così da individuare un workflow generico. In questo paragrafo sono trattati alcuni dei casi studio presi come riferimento.

Tra le prime opere in cui è stata applicata una metodologia BIM in modo completo, compresa la programmazione cronologica, la gestione e la progettazione delle opere provvisorie vi è il Crussel Bridge (Helsinki). Il processo di implementazione del modello BIM è stato fatto con *Tekla Structures* e l'interoperabilità con software FEM è risultata essere la problematica principale. Per risolvere questo problema si sono utilizzate soluzioni diverse in funzione del tipo di informazione da scambiare nelle diverse fasi del progetto, in particolare quando era richiesto solo lo scambio della geometria è stato utilizzato il file formato DWG, invece, quando era necessario uno scambio più ricco di informazioni sono stati utilizzati file IFC, quando erano sufficienti dati alfanumerici o quando la geometria poteva essere descritta in modo parametrico sono stati generati dal modello *Tekla* dei semplici file formato ASCII.

Un secondo caso studio che è stato analizzato è il progetto della nuova passerella di San Donnino, in cui il modello architettonico e il modello strutturale sono stati sviluppati rispettivamente con le piattaforme di BIM authoring *Autodesk Revit* e *Tekla Structures*. In questo caso, al fine di scambiare i dati tra i due programmi sono stati sviluppati tools capaci di generare elementi BIM da modelli FEM e viceversa, creando un flusso di informazioni continuo: in questo modo il modello BIM risulta sempre coordinato e coerente con quello strutturale.

Un altro caso studio preso in considerazione è la nuova metropolitana di Doha. Durante la fase di progettazione sono stati utilizzati diversi software per l'analisi, il disegno, il coordinamento, le verifiche e il rendering, quali *Revit*, *Navisworks* e *Rhinoceros*. “Per mezzo di questi strumenti, è stato possibile costruire un grande modello parametrico, collegando molti oggetti e fonti insieme, anche allegando attributi e fondendo diversi tipi di file” (Di Stefano; 2018), afferma il Project manager della società di progettazione, che precisa: “progettare tali stazioni utilizzando un approccio tradizionale, sarebbe stato impossibile”.

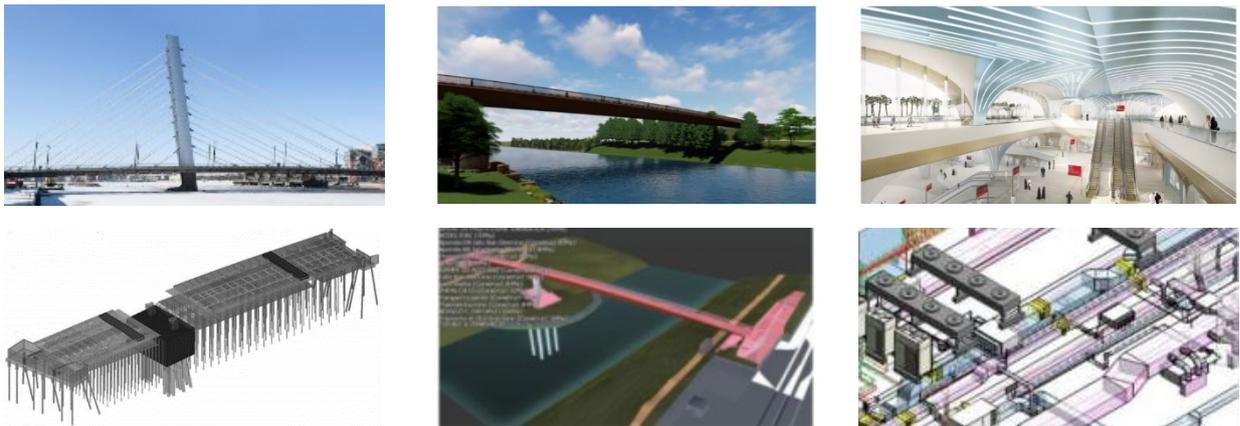


Figura 1.14: Casi studio

In ambito di ricerca, è possibile evidenziare come il numero di pubblicazioni relative al BIM applicato alle infrastrutture è aumentato significativamente dal 2012 ad oggi. “Questo incremento può essere dovuto al UK Government’s *Construction Strategy 2011* che ha reso obbligatoria le applicazioni del BIM a tutti i progetti pubblici”. (Cabinet Office U.K.; 2011)

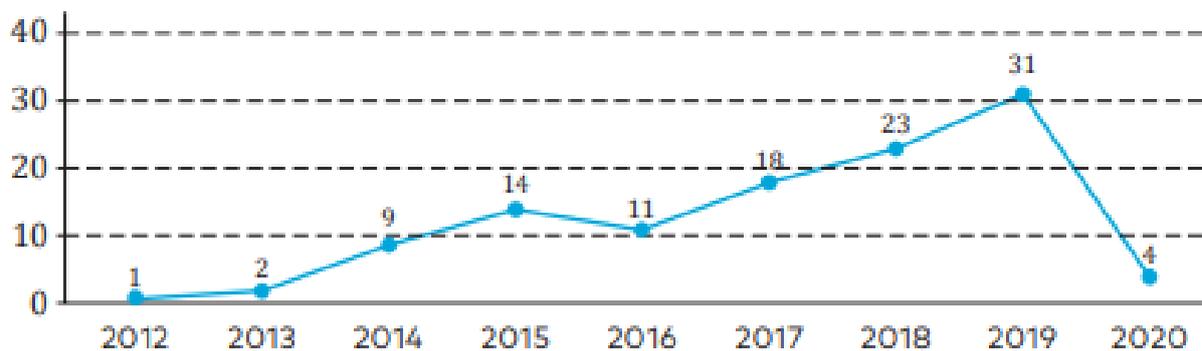


Figura 1.15: Grafico numero di pubblicazioni reltive al BIM / tempo

L’analisi delle pubblicazioni permette di identificare i campi di applicazione, il livello di maturità raggiunto, i vantaggi e i problemi che è in grado di risolvere, e come evolverà il BIM nel settore della progettazione e della costruzione.

Secondo un report UK “*Quantifying the Benefits of BIM*”, applicando la metodologia BIM a tutti i progetti pubblici potrebbe portare all’economia un guadagno di circa 430 milioni di pounds per anno. (Quantifying the Benefits of BIM; 2011).

Mahamadu, Mahdjoubi, Booth, Manu, P. & Manu hanno indagato sull’influenza del BIM nei progetti durante le fasi di progettazione e costruzione di 64 progetti (di cui 56 opere civili e le restanti opere infrastrutturali). La loro ricerca evidenzia che l’applicazione del BIM porta ad una maggiore accuratezza delle informazioni, una migliore integrazione nei processi di costruzione e progettazione, alla capacità di analizzare progetti alternativi e di prendere decisioni razionali. (Mahamadu et al.; 2019)

Yang, & Chou hanno analizzato l’applicazione del BIM nelle fasi di progettazione, costruzione e operativa di 13 progetti differenti (incluse le infrastrutture). Lo studio mostra che il BIM migliora la qualità del 38.5%, riduce i conflitti del 38.5%, rende più chiaro il progetto del 61.5%, riduce le modifiche del 23.1% e aumenta l’accuratezza della stima dei costi del 30.8%. (Yang et al.; 2019)

Capitolo 2

INTEROPERABILITA' & FORMATI

INTEROPERABILITA' & FORMATI

2.1 STRUMENTI BIM - INFRABIM

Visti gli enormi vantaggi della tecnologia BIM, è naturale conseguenza la sua sempre maggiore diffusione. La tecnologia BIM è utilizzata da svariati software che, da sempre, hanno voluto mantenere il file del prodotto finale nei propri formati; tuttavia, considerato che è in corso il dibattito sulla necessità di standardizzare gli oggetti BIM, è sempre più accettata l'idea di avere un unico formato di file finale. Ad oggi, la standardizzazione dei file creati con tecnologia BIM tra i diversi software in commercio è uno dei problemi più importanti e irrisolti. L'uso di un software rispetto ad un altro dipende anche dal tipo di opera da progettare (struttura o infrastruttura) e dal livello di progettazione (preliminare, definitivo o esecutivo), oltre che da tutte le altre condizioni al contorno che caratterizzano la fase di progettazione.

La prima software - house ad utilizzare la tecnologia BIM è la *Graphisoft* con *ArchiCAD*. Ciò che rende, ancora oggi, *ArchiCAD* un software competitivo nella progettazione in BIM è l'aver diversi tipi di collegamenti a più strumenti appartenenti a diversi domini (*Tekla*, *Revit Structure*, *FemDesign*, *Ecotect*, *Graphisoft EcoDesigner*), sia in modo diretto sia attraverso lo scambio di file in formato .IFC.



Figura 2.1: Logo Graphisoft ArchiCAD

Attualmente sono diverse le software-house che si occupano della produzione e sviluppo di software BIM e ogni anno la *NBS* pubblica il *National BIM Report*, ovvero un articolo in cui si raccolgono dei dati e si effettuano dei sondaggi volti a capire quale sia il livello di adozione del BIM tra i progettisti e quali software tra quelli disponibili siano i più utilizzati. Di seguito si riporta un'immagine relativa all'articolo del 2020.

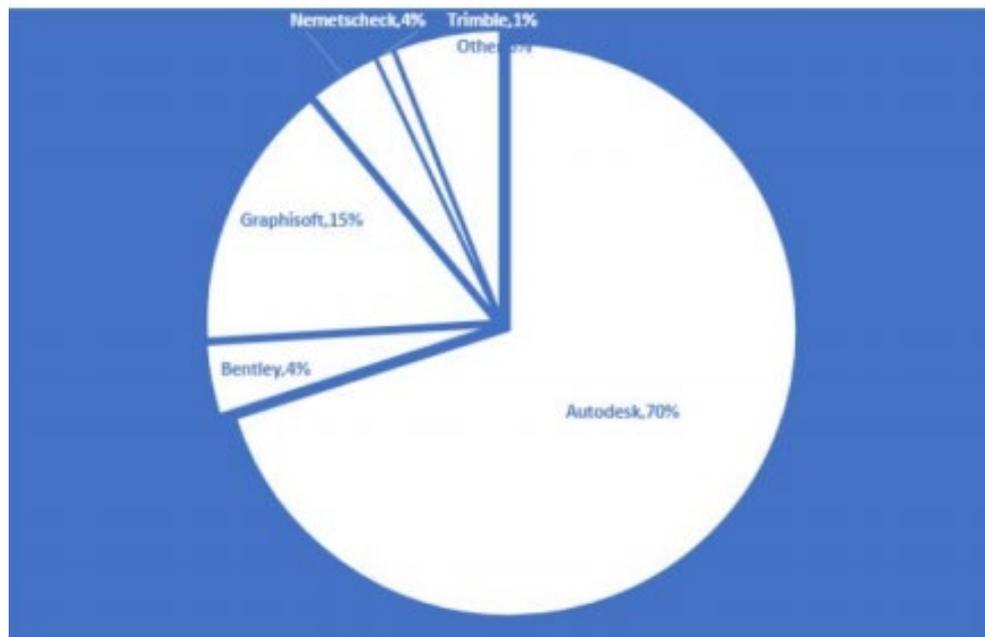


Figura 2.2: Livello di adozione BIM - software house

Dal grafico si evince che due aziende sicuramente meritano una menzione diversa, in quanto ad oggi, leader nello sviluppo di software BIM: *Autodesk* e *Bentley Systems*. In particolare, se *Autodesk* è una software-house che si occupa della produzione e sviluppo di software parametrici per la gestione e progettazione sia per piccole strutture che per grandi infrastrutture, *Bentley Systems* negli ultimi anni si è per lo più dedicata allo sviluppo di software BIM propri della progettazione infrastrutturale (ponti e viadotti) e viaria (strade e ferrovie).

Autodesk - Autodesk Revit

Autodesk Inc. è un'azienda di software e di servizi rivolti alla progettazione di infrastrutture, costruzioni civili e industriali, ma anche di contenuti multimediali per l'intrattenimento, progettazione meccanica e manifatturiera e sistemi PLM (Product Lifecycle Management).



Figura 2.21: Logo Autodesk

L'azienda è stata fondata da *John Walker* e da altri dodici cofondatori nel 1982 con l'immissione nel mercato del software *AutoCAD* per poi proseguire con un'ampia gamma di prodotti. Al giorno d'oggi, stanno riscontrando importante successo tra i clienti le diverse "App" messe a disposizione dagli sviluppatori *Autodesk* per i sistemi iOS e Android, rendendo più facile e veloce lo scambio di file tra i vari utenti.

Tra i software *Autodesk* più utilizzati vi sono sicuramente *AutoCAD* per quel che riguarda la progettazione in CAD e *Revit* per quel che riguarda la progettazione in BIM. Tramite lo sviluppo dei software *Civil 3D*, *Infraworks* e *Naviswork*, *Autodesk* è andata oltre la progettazione edile estendo l'uso dei propri software alla progettazione strutturale ed infrastrutturale; ad oggi sono 10 milioni i professionisti che, in ben 185 paesi, utilizzano i prodotti Autodesk.

Autodesk Revit è senza dubbio il software più noto e utilizzato nel mercato tra i software BIM di progettazione architettonica; è uno strumento di progettazione BIM che permette la creazione di un modello 3D intelligente per pianificare, progettare, costruire e gestire il progetto.



Figura 2.22: Logo Revit

Autodesk Revit venne creato nel 2000 dalla *Revit Technologies Inc.* dando vita ad uno strumento del tutto diverso da *AutoCAD* e che presenta una struttura propria molto innovativa. Nel 2002 venne poi acquistato da *Autodesk* per 133 milioni di dollari, la quale col passare degli anni ha aggiornato in software fino ad ottenere l'ultima versione che attualmente è quella del 2021. Questo software offre una famiglia di prodotti integrati che, attualmente, include *Revit Architecture*, *Revit*

Structure e Revit MEP, i quali sono rivolti rispettivamente a architetti e progettisti edili; ingegneri strutturali e ingegneri meccanici; elettricisti e impiantistici.

Il software presenta numerosi punti di forza grazie alla sua interfaccia userfriendly e ai numerosi ed efficaci strumenti di produzione di disegno. È una piattaforma forte grazie alla vasta gamma di applicazioni di supporto e di librerie di oggetti, sviluppate sia internamente che da terzi. Sono diversi i formati supportati da questo software: DWG, DOF, DGN, SAT, DWF / DWFo, ADSK, html, OSA, gbXML, IFC, e ODBC. *Autodesk Revit* permette inoltre, di creare degli oggetti parametrici personalizzati o di personalizzare elementi già presenti nella libreria.

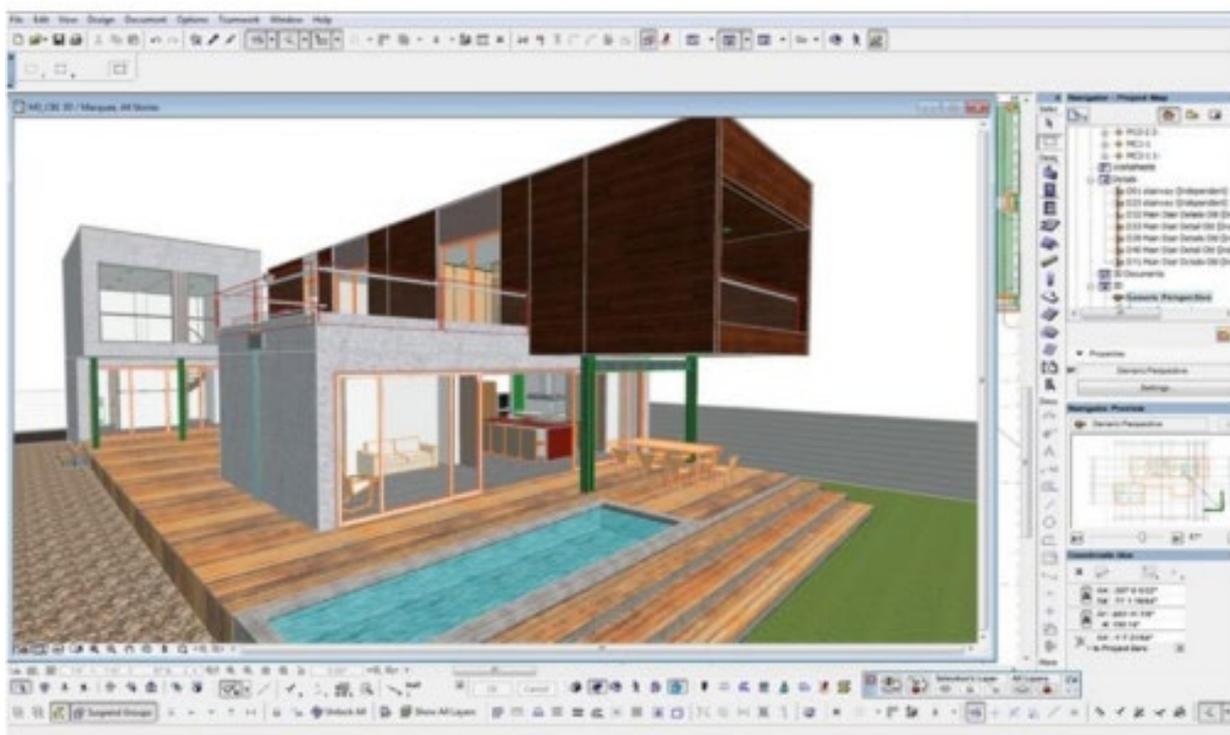


Figura 2.23: Interfaccia Revit

Tralasciando l'ostacolo rappresentato dall'interoperabilità che interessa l'intero comparto BIM, tra i limiti di *Autodesk Revit* vi è anche la necessità di appoggiarsi a un software ausiliario quale *Dynamo* per l'implementazione del modello, mentre altre software – house permettono il raggiungimento degli stessi risultati in modo più semplice e intuitivo. Inoltre, essendo *Autodesk Revit* un sistema “in-memory”, esso rallenta in modo significativo con progetti di dimensioni maggiori ai 300 megabyte. Un'altra grossa limitazione è, invece, rappresentata dalle non trascurabili difficoltà che si riscontrano nella progettazione delle superfici curve complesse. Tale limitazione rende, ad oggi, *Autodesk Revit* poco adattabile alla progettazione e gestione di progetti di grandi infrastrutture, come nel caso della progettazione di infrastrutture viarie (strade, ferrovie), e delle grandi strutture (ponti e tunnel). Come ambiente BIM, *Autodesk Revit* è in grado di trasportare tutte le informazioni relative agli oggetti; tuttavia, questa operazione avvenendo a livello

di file, e non a livello di oggetto, risulta essere una limitazione nella sincronizzazione degli oggetti con differenti viste in file diversi.

Il modello in ambiente *Autodesk Revit* è costituito da un insieme di componenti parametrici: ogni elemento non contiene soltanto informazioni geometriche (come avviene in CAD) ma anche fisiche, meccaniche, costo, filiera: ciò permette di ottenere un contenitore di informazioni condivisibili tra gli utenti, per gestire al meglio la commessa. *Autodesk Revit* è un software BIM multi-dimensionale e fornisce la possibilità di associare una variabile temporale agli elementi, per quanto non di dettaglio: è possibile infatti definire la fase di creazione e demolizione dei singoli elementi. È inoltre possibile creare abachi, computi delle quantità e lista dei materiali e analizzare nel dettaglio tutti i componenti utilizzati nel progetto. Un abaco infatti rappresenta un tipo di visualizzazione del modello alternativa, e per *Autodesk Revit* è una vera e propria vista, al pari di una pianta o una sezione, per quanto è in realtà un report in forma tabellare delle informazioni che l'utente sceglie di estrarre. Si crea così una dualità modello-abaco che in realtà equivale a una dualità tra viste, con l'utilità di poter visualizzare e apportare modifiche alfanumeriche dall'abaco e visualizzarle istantaneamente sul modello e viceversa. Ciò si traduce in una totale flessibilità delle modifiche definite in fase di pianificazione quanto di progettazione, riducendo l'impatto che queste hanno sull'economia del processo.

Nel lavoro di tesi, per la modellazione con metodologia BIM è stata utilizzata la versione per studenti di *Autodesk Revit 2021*, di cui è possibile illustrare il framework concettuale su cui si basa, ma è importante evidenziare che ogni BIM authoring software ha il proprio framework e il proprio formato proprietario. In *Autodesk Revit* la definizione degli elementi, segue una scala gerarchica, in cui ogni elemento appartiene ad una categoria, che ne determina la funzionalità e come esso può essere usato nel modello.

Autodesk Revit contiene al suo interno delle categorie di oggetti dette **Famiglie**, che sono classi di elementi con un set comune di parametri, detti **Proprietà**, con uso identico e rappresentazione grafica simile. Elementi diversi di una famiglia possono avere valore diverso per alcune o per tutte le proprietà, ma il set di parametri è lo stesso. Il software presenta tre tipi di famiglie: famiglie di sistema, famiglie locali e famiglie caricabili.

Le **famiglie di sistema** sono in genere usate per creare elementi semplici, come ad esempio, muri, tetti, pavimenti, scale e possono essere inseriti dalla tab di Architettura, Struttura, Acciaio e Sistemi. La caratteristica principale di queste famiglie è che sono predefinite all'interno del software: non è possibile

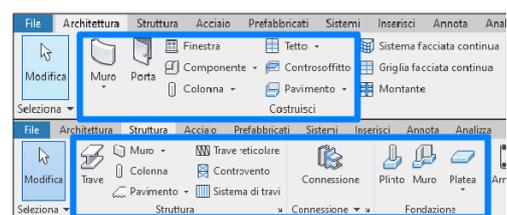


Figura 2.24: Famiglie di sistema

caricarle partendo da un file esterno o salvarle esternamente al progetto.

Le **famiglie caricabili** sono generalmente usate per creare componenti che vengono acquistati, sviluppati e installati all'interno o all'esterno dell'edificio, come finestre, porte e a causa della loro natura personalizzabile si possono utilizzare per modellare svariati oggetti. Queste famiglie sono create in file esterni **.rfa** e importati in ogni singolo file di progetto **.rvt**. *Autodesk Revit* mette a disposizione una propria libreria nella quale è possibile selezionare e caricare queste famiglie.

Le **famiglie locali** sono elementi unici e vengono adottate quando è necessario disporre di un componente specifico nel progetto corrente. Per questo, esse vengono utilizzate quando si presume di non riutilizzare l'elemento in altri progetti.

Un altro concetto fondamentale in *Autodesk Revit* è la distinzione tra **parametri di tipo** e **parametri di istanza**, che possono essere contenuto in ogni oggetto. Se il primo venisse modificato, questa caratteristica varia in tutte le istanze a essa connessa. Mentre, se fosse modificato un parametro di istanza, la variazione si ha solamente nell'oggetto modificato. Inoltre, è possibile definire altre tre classi di parametri in un modello BIM. La prima sono i **parametri globali** che vengono utilizzati per definire i valori di altri parametri, infatti essi sono riportati negli abachi, nei quali è possibile svolgere diverse azioni, tra cui le operazioni tra i parametri. Un'altra classe di parametri sono i **parametri condivisi** che hanno la peculiarità di poter essere condivisi tra diversi progetti e famiglie e sono esportabili al di fuori del progetto. Anche questa classe di parametri è visualizzabile negli abachi. Infine, si hanno i **parametri di progetto** che sono parametri che possono essere aggiunti alle categorie degli elementi nel progetto, visibili negli abachi ma non è possibile dividerli con altri progetto o famiglie.

Di seguito si riporta un esempio, che evidenzia la gerarchie della classificazione di un oggetto parametrico in *Autodesk Revit*.

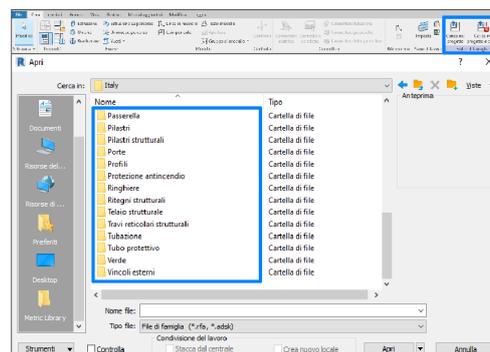


Figura 2.25: Famiglie caricabili



Figura 2.26: Famiglie locali

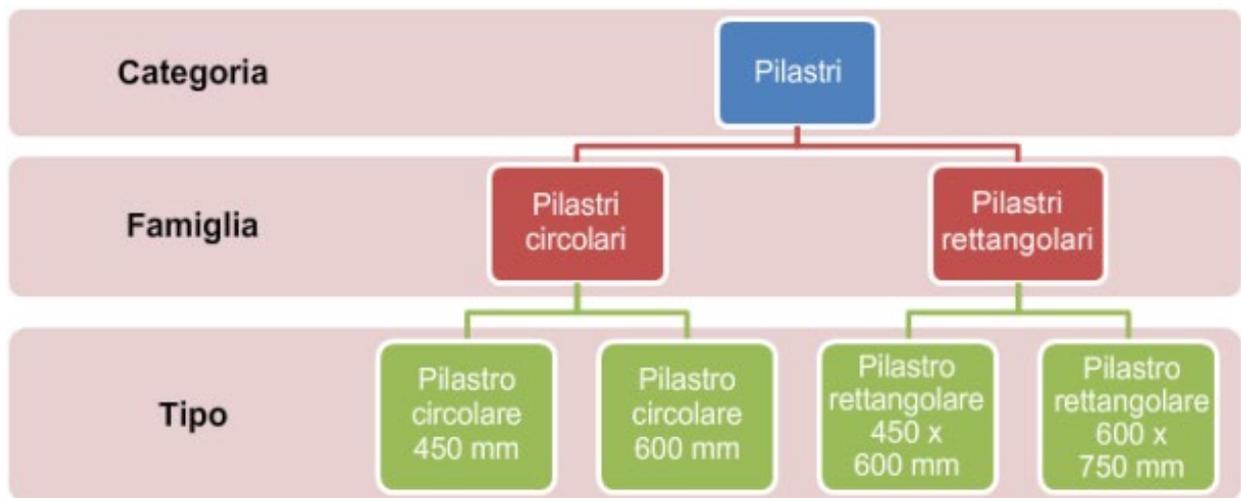


Figura 2.27: Gerarchie della classificazione di un oggetto parametrico

Bentley Systems - OpenRoads ConceptStation, OpenRoads Designer & OpenBridge Designer

Bentley Systems è un'azienda di sviluppo di software nata per assistere i professionisti impegnati nella creazione e nella gestione delle infrastrutture nel mondo, come ponti, strade, aeroporti, grattacieli, impianti industriali, centrali elettriche e reti di servizi.



Figura 2.28: Logo Bentley

Bentley è fondata nel 1984 e ad oggi conta più di 3.500 dipendenti in più di 50 paesi, con un fatturato annuo destinato a superare i 700 milioni di dollari. Dal 2014, l'azienda ha investito più di un miliardo di dollari in ricerca, sviluppo e acquisizioni. Tra i vari software messi a disposizione da *Bentley Systems*, le applicazioni “*OpenRoads*” sono quelle che permettono l’elaborazione dei progetti di reti stradali e di infrastrutture civili. Le applicazioni *OpenRoads* supportano, inoltre, lo scambio di informazioni in tutto il ciclo di vita del progetto, tra tutti i partecipanti del team, per la realizzazione dello stesso. I due applicativi *OpenRoads* sono:

- ***OpenRoads ConceptStation***: consente la realizzazione di progetti rapidi ed iterativi, concettuali e preliminari, fornendo informazioni contestuali raccolte da nuvole di punti, mesh poligonali, GIS e altre risorse.
- ***OpenRoads Designer***: consente la misurazione e la progettazione di reti fognarie, installazioni sotterranee e strade, che riunisce tutte le caratteristiche precedentemente disponibili in *InRoads*, *GEOPAK*, *MX* e *PowerCivil*.



Figura 2.29: Logo OpenRoads ConceptStation / Designer

Tutte le soluzioni *Bentley* sono costituite da applicazioni e servizi integrati basati su una piattaforma aperta e sono state studiate per garantire la mobilità delle informazioni tra team di progetto e processi dei flussi di lavoro, in modo da promuovere l'interoperabilità e la collaborazione tra i diversi team che cooperano allo stesso progetto. Bentley si avvale di diversi strumenti per la modellazione degli

edifici e permette la modellazione di superfici curve e complesse, tanto da rendere i suoi software leader nella progettazione di infrastrutture viarie. Inoltre, l'azienda fornisce anche un'assistenza agli utilizzatori 24 ore su 24, 7 giorni su 7. L'azienda inoltre si propone di offrire opportunità di formazione continua mediante corsi, seminari online e programmi accademici.



Figura 2.30: Interfaccia OpenRoads ConceptStation

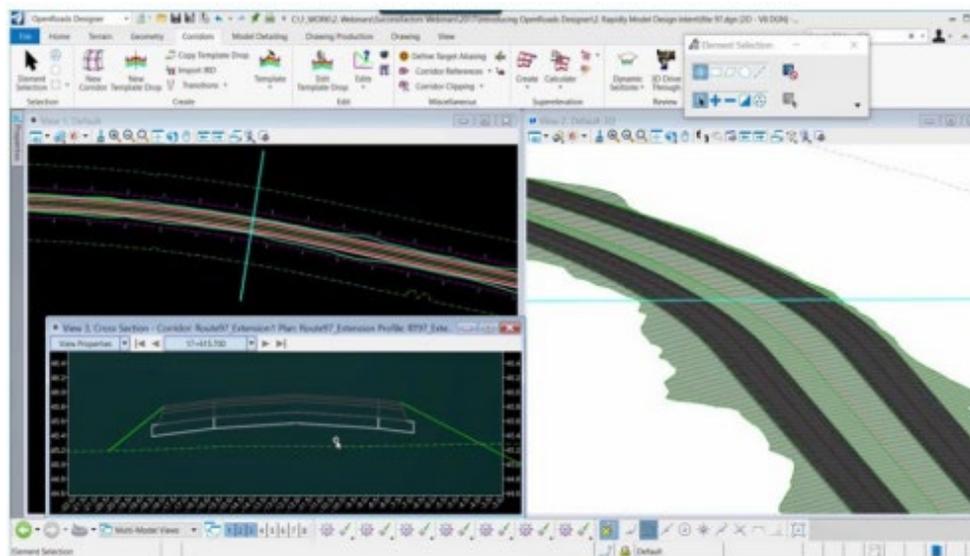


Figura 2.31: Interfaccia OpenRoads Designer

Un altro software della *Bentley Systems* da citare è **OpenBridge Designer**, in quanto permette la creazione di modelli, l'analisi e la progettazione dei ponti. Con questa unica applicazione, è possibile produrre modelli intelligenti tramite funzionalità intuitive per la progettazione parametrica e aumentare le performance tramite la realizzazione automatizzata dei disegni.

2.2 STRUMENTI PER IL CALCOLO STRUTTURALE

I software di calcolo strutturale sono molteplici. Essi forniscono soluzioni molto specifiche ai problemi dell'ingegneria strutturale, permettono lo studio della costruzione e come essa lavora. La maggior parte dei software di calcolo strutturale si basano sul metodo degli elementi finiti, indicato con l'acronimo FEM (Finite Element Method). Il FEM è un sistema di calcolo strutturale nato negli anni '50 come sviluppo del metodo degli spostamenti e si basa sul Principio del Minimo dell'Energia Potenziale Totale e il Principio del Lavoro Virtuale. Il FEM è una procedura che discretizza l'oggetto preso in analisi in elementi di forma semplice e connessi tra di loro da punti nodali. Questo processo avviene mediante delle funzioni di forma e spostamento che permettono di descrivere come si comporta una struttura analizzando il comportamento delle parti finite in cui è stata suddivisa la struttura. Così facendo, è possibile ridurre ad un numero determinato gli infiniti gradi di libertà degli elementi strutturali presi in considerazione. Essendo un processo di discretizzazione, più piccoli saranno gli elementi finiti in relazione alle dimensioni della struttura, più il modello sarà corrispondente alla realtà.

Preventivamente alla scelta del software di calcolo strutturale è stata compiuta una ricerca sui programmi commerciali BIM compatibili, inizialmente due software sono stati selezionati. Nella presente tesi ci si è soffermati su alcuni aspetti, ritenuti indispensabili in questa prima fase:

- Presenza di direct link in *Autodesk Revit*: questo strumento rende più agevole e veloce la comunicazione tra un software e l'altro.
- Possibilità di utilizzare il formato di scambio standard, l'IFC (Industry Foundation Classes): esso è un formato dati aperto, nato per facilitare l'interoperabilità tra i vari operatori che partecipano all'intero ciclo di vita della struttura.
- Utilizzo di normative nazionali e internazionali: è importante trovare un software capace di risolvere eventuali problemi.
- Affidabilità del software di calcolo agli elementi finiti: la complessità della struttura può essere più o meno elevata, è importante trovare un software preparato ad entrambi i casi.

Sono stati confrontati diversi software di calcolo strutturale privilegiando gli aspetti riguardanti l'interoperabilità, e come detto precedentemente, due soluzioni sono state trovate.

La prima soluzione è *Robot Structural Analysis*, il programma strutturale della *Autodesk*. Tale software presenta un livello di interoperabilità il più alto possibile. Nonostante alcuni test preliminari condotti avessero dato buon esito si è optato per un software tra i più rinomati tra i professionisti italiani per via della sua estrema

versatilità, potenza di calcolo e che permette lo scambio di dati sia attraverso formato IFC che attraverso un formato interno: la scelta è ricaduta quindi su *SAP2000*, in particolare, nella presente tesi si è utilizzato *SAP2000 v22*.



Figura 2.32: Logo ROBOT



Figura 2.33: Logo SAP2000

SAP2000

SAP2000 è un prodotto di *Computers and Structures Inc. (CSI)*, esso è uno dei software strutturali maggiormente utilizzato sia per l'analisi che per la progettazione, nell'ambito dell'ingegneria civile.

SAP2000 permette di lavorare su qualunque tipologia di struttura/infrastruttura, anche se complessa e con caratteristiche particolari. Le fasi di modellazione, analisi e progettazione sono integrate nell'ambiente grafico che risulta essere intuitivo e facilmente utilizzabile. La sua versatilità permette al software l'applicazione sia a piccoli progetti che a grandi, i quali richiedono molta attenzione. Per queste ragioni, esso è considerato probabilmente il miglior software per l'analisi strutturale e con un'elevata produttività.

Allo stesso tempo, *SAP2000* è uno dei software maggiormente suggeriti per le aziende che vogliono o che sono obbligate a lavorare con la metodologia BIM, in quanto, esso permette lo scambio di dati con software per la progettazione architettonica. Esso offre la possibilità di importare ed esportare dati attraverso i principali standard di modellazione: IFC, dxf, Steel Detailing Neutral File. Oltretutto, esso permette un collegamento diretto con alcuni software di modellazione BIM – based, come *Autodesk Revit* e *Tekla Structures*, attraverso l'utilizzo di plugin forniti dalla stessa software - house.

Nella tesi, in un primo momento, la scelta è stata quella di non seguire il percorso più immediato, ovvero attraverso l'utilizzo del plugin, ma si è scelto di utilizzare un formato differente, al fine di testare il livello di interoperabilità che può essere raggiunto con un formato libero. In particolare, è stato testato il formato IFC, ma come detto precedentemente, solo nella fase iniziale in quanto il livello di interoperabilità raggiunto non è stato sufficiente.

Prima di spiegare i vantaggi e gli svantaggi dell'interoperabilità, è importante definire il formato IFC in un paragrafo apposito.

2.3 INTEROPERABILITA'

Poiché architettura, ingegneria e costruzioni sono attività collaborative e non esiste un software capace di gestire tutti i lavori associati ad esse, sono necessari strumenti che consentano lo scambio dei dati tra professionista e professionista e tra applicazione e applicazione. A tal proposito, l'interoperabilità nasce al fine di cercare di fornire soluzioni. Al riguardo, generalmente, le software-house provvedono a implementare dei formati di scambio interno o plug-in per consentire lo scambio dei dati tra i vari ambienti di progettazione: architettonico, impiantistico, strutturale, computo metrico ecc.,. Queste possibilità di scambio consentono un livello di interoperabilità molto alta e, nello specifico il collegamento interno, consente di esportare il modello senza compiere un salvataggio intermedio che potrebbe portare ad una perdita delle informazioni. Spesso poi il collegamento è bidirezionale permettendo di aggiornare il modello architettonico con i risultati ottenuti del software specifico. In questo paragrafo viene trattato il tema principale della tesi: l'interoperabilità per l'analisi strutturale. In letteratura internazionale si trovano diverse definizioni di interoperabilità, di cui ne vengono proposte tre:

- *identifica la necessità di condividere dati tra applicazioni, e per applicazioni multiple al fine di contribuire congiuntamente al lavoro finale.* (Eatsman et al., 2008)
- *è la capacità di differenti programmi di scambiare dati attraverso dei formati di scambio comuni; per leggere e scrivere lo stesso file; per usare lo stesso protocollo.* (Del Giudice, 2020)
- *si realizza mappando le parti della struttura dati interna di ciascuna applicazione partecipante verso un modello di dati universale e viceversa.* (National Institute of Building Sciences, 2007)

L'obiettivo principale dell'interoperabilità è quello di avere i dati giusti nel formato giusto al momento giusto, in altre parole, essa fornisce la capacità di cambiare software e scambiare dati tra specifici software. L'interoperabilità è dunque il requisito essenziale affinché nei progetti il BIM venga effettivamente impiegato come metodologia e non solo per l'implementazione di un modello semplificato da utilizzare durante la sola fase di progettazione.

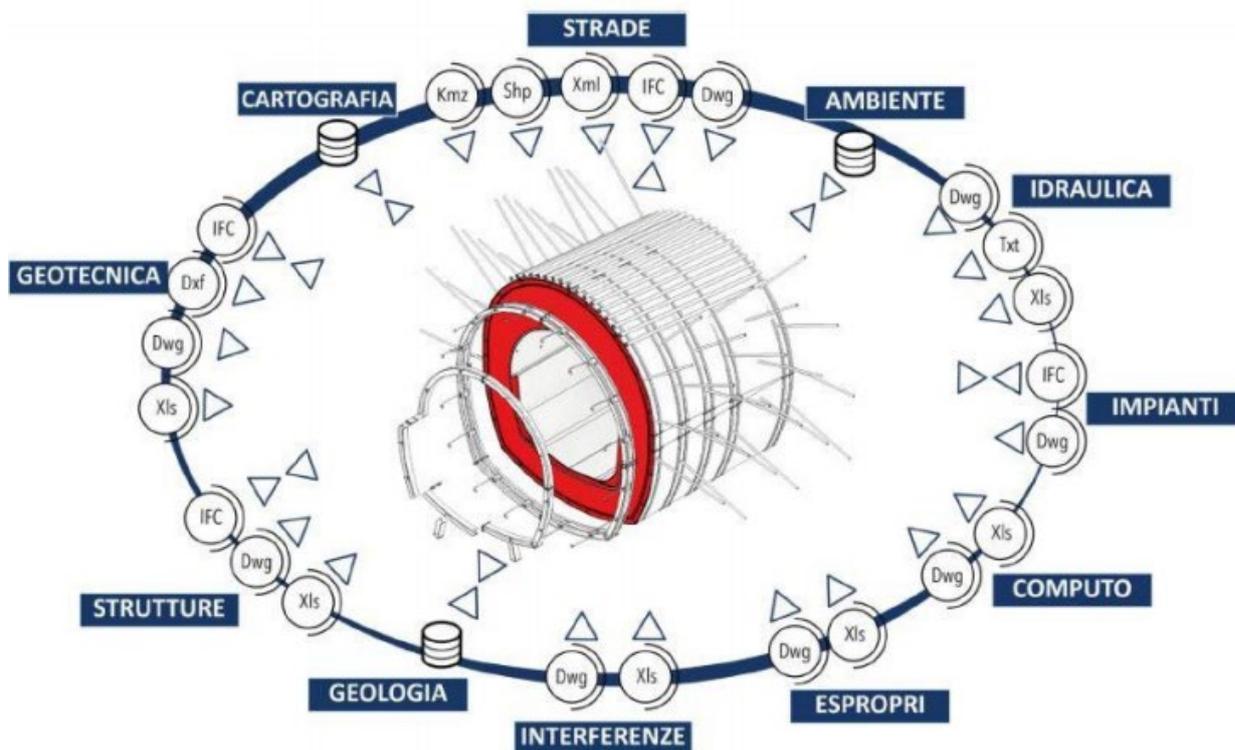


Figura 2.34: Interoperabilità

Per definire in maniera inequivocabile le condizioni di scambio delle informazioni, sono necessari dettagliati standard tecnici, poiché gli utenti che trasferiscono i dati ovviamente lo fanno utilizzando diversi tipi di software. Questi software devono contenere al loro interno tutti gli standard, e lo devono fare nascondendone la complessità all'utente e facendo in modo che essi siano messi in atto automaticamente dal sistema. Grazie all'introduzione di questa metodologia, gli enti e i progettisti non dovranno scambiare e richiedere dati da altri membri coinvolti nella progettazione ma avranno a disposizione un unico modello arricchito di tutte le informazioni necessarie allo sviluppo e alla successiva costruzione e manutenzione dell'opera.

Poiché i tradizionali approcci di condivisione delle informazioni di progetto attraverso lo scambio di file nei formati come .dxf, .dwg e .pdf non trasferiscono adeguati livelli di intelligenza degli oggetti da un modello ad un altro, occorre perseguire nuovi approcci finalizzati ad uno scambio di dati più intelligente, necessariamente con l'impiego di nuovi formati. Al momento attuale, lo scambio dei dati tra due applicazioni avviene tipicamente attraverso quattro modi principali:

- diretto: collegamenti proprietari (coperti da copyright) tra specifici strumenti BIM;
- formati di scambio proprietari: principalmente focalizzati sulla geometria;
- formati modello di scambio di dati di prodotto pubblici come ad esempio quello IFC (Industry Foundation Classes);
- formati di scambio basati su XML.

Quindi, ci sono diverse tipologie di formati di scambio dati, tra queste, quelle utilizzate durante la tesi sono: il formato EXR e il formato IFC. Per quanto riguarda la prima tipologia, esso è un formato di scambio proprietario, sviluppato dalla software-house californiana CSI, consente uno scambio dati diretto fra *SAP2000/ETABS/SAFE* e *Autodesk Revit*. Mentre, il formato IFC è stato sviluppato dalla *buildingSMART*, e ad oggi, rappresenta il formato di scambio dati preferenziale per tutto il mondo della progettazione BIM, in quanto esso è utilizzato dalla maggior parte dei software di progettazione.

Revit to SAP200: Formato IFC

Normalmente un oggetto BIM viene salvato nel formato “IFC” (Industry Foundation Class), con estensione “.ifc”. Il formato IFC venne creato dalla *BuildingSMART*, la quale è un’associazione mondiale nata nel 1995 e che guida la trasformazione digitale nel settore delle costruzioni. Essa attraverso il programma *OpenBIM* guida lo sviluppo di standard tecnici, strumenti e formazione riconosciuti a livello internazionale per supportare la più ampia diffusione del BIM da parte del settore Architecture, Engineering & Construction (AEC) e del Facility Management (FM).



Figura 2.35: Logo buildingSMART

Le caratteristiche principali del formato IFC sono la esigua dimensione dei files, il contenuto tridimensionale identico all’originale e soprattutto la capacità di trasmettere ad altre piattaforme BIM le informazioni aggiuntive degli oggetti inseriti senza bisogno di ulteriori trasformazioni. Il formato IFC è di tipo open-source ed è importante evidenziare che, esso non è venduto dalle software – house, ma è completamente libero e accessibile da tutti gli utilizzatori. Oltretutto, l’IFC è una rappresentazione digitale standardizzata dell’edificio o dell’infrastruttura, infatti esso è uno standard internazionale definito dalla ISO 16739: 2013: è indipendente dai venditori (probabilmente è il suo vantaggio principale) ed è supportato da diverse software-house, tra cui Autodesk. Chiaramente, questa tipologia di scambio dati rappresenta la base dell’interoperabilità nell’intero settore BIM.

La possibilità di condividere dati tramite varie applicazioni rende il formato IFC come l’equivalente architettonico di HTML: ciò può introdurre alcuni problemi legali e di proprietà, ma può anche svincolare architetti, consulenti, utenti e altri professionisti ad essere legati a un unico fornitore o piattaforma. Il formato IFC rappresenta una soluzione di interoperabilità tra diverse applicazioni software che utilizzano il BIM, è quindi importante riconoscere degli standard internazionali relativi ad oggetti comunemente utilizzati nel settore edilizio. Pertanto, si noti come il formato IFC, sostenendo l’interoperabilità e i processi BIM collaborativi e collegati, svolga un ruolo di vitale importanza nella collaborazione fra i team di progetto.

Oggigiorno, esistono diverse versioni di questo formato, quelle principali sono:

- IFC2x3: è attualmente il formato più supportato e stabile;

- Export Type Coordination View 2.0: implica la perdita di dati e/o cambiamenti;
- IFC4: è quello che offre possibilità avanzate ma non è ancora ampiamente supportato;
- IFC2x2: consigliato se il destinatario del file non dispone di un software che supporta il formato IFC2x3 e IFC4;
- IFC5: è stata realizzata da poco tempo, permette la condivisione di un numero maggiore di informazioni.

In particolare, il formato IFC è un metodologia di standardizzazione di informazioni in un modello attraverso una codifica che, crea un modello di edificio basato su una struttura predefinita che costruisce il modello in modo logico. Una volta salvato, il file IFC dispone in ordine gerarchico le unità in base al loro tipo.

IFC - Vista della struttura

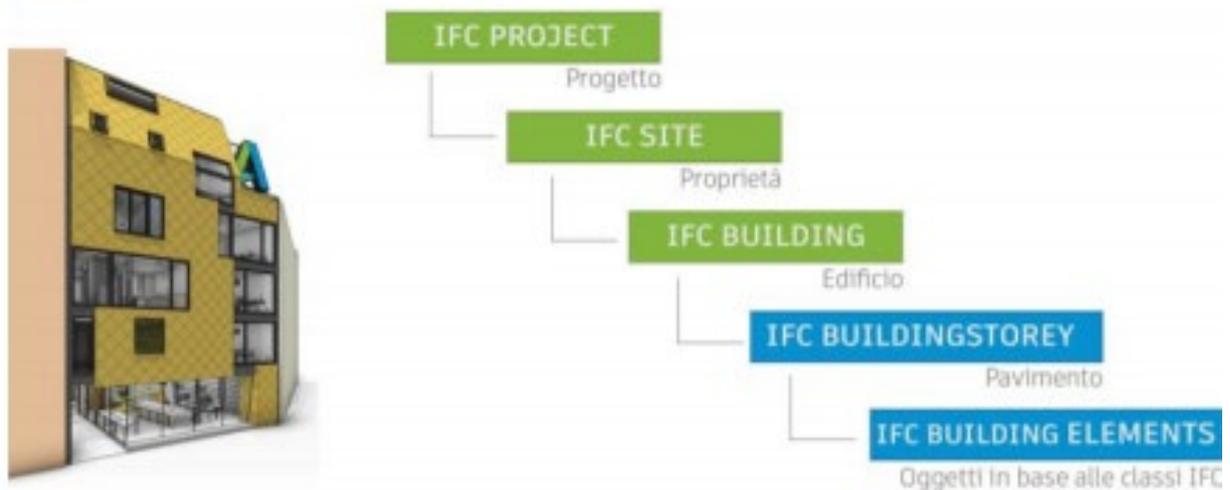


Figura 2.36: Gerarchizzazione nel IFC

Questa tipologia di schema può contenere molti dati e descrivere le specificità della costruzione in oggetto: l'IFC permette di descrivere le caratteristiche fisiche e non fisiche di un prodotto, il suo modello di analisi strutturale, il suo sistema meccanico ed elettrico, i suoi costi e molti altri aspetti.

Per fare ciò, è necessario seguire uno schema costituito da differenti fasi che tiene conto dell'evoluzione dell'infrastruttura che si sta modellando.

- Fase 1, Gerarchia delle classi concettuali: questa fase prevede la realizzazione di un modello gerarchico per classi del tutto teorico. Gli elementi che compongono le infrastrutture sono definiti in maniera standardizzata e si evidenziano anche delle relazioni gerarchiche con gli altri elementi del modello.
- Fase 2, Modello di dati geometrico: è la fase necessaria alla definizione delle coordinate bidimensionali o tridimensionali degli elementi del modello.

Sulla base di queste coordinate sarà possibile individuare forma, dimensione e localizzazione delle entità senza far riferimento ad alcuna informazione relativa al materiale e allo spessore.

- Fase 3, Modello di dati semantico: in questo caso il modello viene arricchito attribuendo agli elementi delle informazioni non di tipo geometrico ma di tipo semantico.

Autodesk Revit associa direttamente alle categorie una classe IFC, nel momento in cui il modello è esportato in un file IFC; è anche possibile fare questa operazione manualmente, ovvero, assegnare agli elementi del modello *Autodesk Revit* la classe IFC voluta.

CSI fornisce un manuale per l'importazione e l'esportazione di un file IFC da e verso SAP2000, in particolare esso è costituito da una tabella che evidenzia le entità IFC che vengono importate e non, e con eventuali limitazioni. Di seguito viene riportato un astratto della tabella con le principali entità IFC utilizzate.

IFC entity	Imported	Restrictions
IfcBeam		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. The end points typically require adjustment by the user as they are at the face of the support – wall, column, or girder. Always imported as a straight line.
IfcColumn		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. Always imported as a straight line
IfcWall		
IfcCurtainWall		
IfcPlate		
IfcRoof		

IfcSlab		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. Always imported as a straight line
---------	--	---

Tabella 2.4: Astratto del manuale CSI - IFC

Revit to SAP200: Formato EXR

Il formato EXR è un formato di scambio dati proprietario, sviluppato dalla software – house *CSI* e utilizzabile previa installazione del plugin *CSIXRevit* in *Autodesk Revit*.

CSIXRevit permette di scambiare dati tra *Autodesk Revit* e i software della *CSI*, quali *SAP2000*, *ETABS* e *SAFE*. Esso è uno strumento con grandi potenzialità, in quanto permette la condivisione di varie specificità del modello, migliora la produttività tra gli attori coinvolti e i dati vengono scambiati rapidamente.

In particolare, è possibile utilizzare *CSIXRevit* per diversi fini, quali:

- Esportazione da *Revit* per creare un nuovo modello in *ETABS*, *SAP2000* o *SAFE*.
- Esportazione da *Revit* per aggiornare un modello in precedenza esportato o importato in *ETABS*, *SAP2000* o *SAFE*.
- Importazione di un modello da *ETABS*, *SAP2000* o *SAFE* per creare un nuovo modello *Revit*.
- Importazione di un modello *ETABS*, *SAP2000* o *SAFE* per aggiornare un modello importato o esportato in precedenza da *Revit*. In questo caso, si può scegliere di aggiornare la progettazione, la locazione o entrambi.

CSI fornisce un manuale per l'importazione di un file EXR da *Revit* per creare un nuovo modello *SAP2000*, in particolare esso è costituito da una tabella che evidenzia gli elementi di *Revit* che vengono importate e non, e con eventuali limitazioni. Di seguito viene riportato un astratto della tabella con i principali elementi che sono stati utilizzati per creare il modello in *Autodesk Revit*.

Action	Project Element	Supported	Notes
Creation of...			
	Grid Lines		Does not transfer.
	Materials		
	Columns and Framing Elements		Transfers geometry, beam and brace y and z justifications, and end releases into SAP2000. Ignores end offsets.
	Column and Framing Element Sections		
	Walls		Imports walls as SAP000 area objects with wall

			openings imported as separate area objects with “None” properties. Imports curved Revit walls as a series of short planar SAP2000 area objects. Slanted walls and warped walls with more than four sides not imported. Slanted walls do not have an analytical model in Revit.
	Wall Properties		Creates and maps equivalent SAP2000 thick shell sections.
	Floors		Imports floors as SAP000 area objects with floor openings imported as separate area objects with “None” properties.

Tabella 2.5: Astratto del manuale CSI - EXR

Capitolo 3

CASO STUDIO: PONTE FRANCO BALBIS

CASO STUDIO: PONTE FRANCO BALBIS

3.1 DESCRIZIONE DEL PONTE BALBIS

Il ponte Franco Balbis è un ponte ad arco a vie superiori in cemento armato, commissionato dall'amministrazione comunale della città di Torino, che collega le regioni di Nizza e Lingotto ed il traffico Corso Moncalieri in direzione Genova. Nel 1924, Nizza e Lingotto si stavano trasformando in un distretto industriale e ciò ha fatto nascere la necessità di un nuovo ponte stradale, di cui si ebbe la redazione di un progetto di massima l'anno successivo.

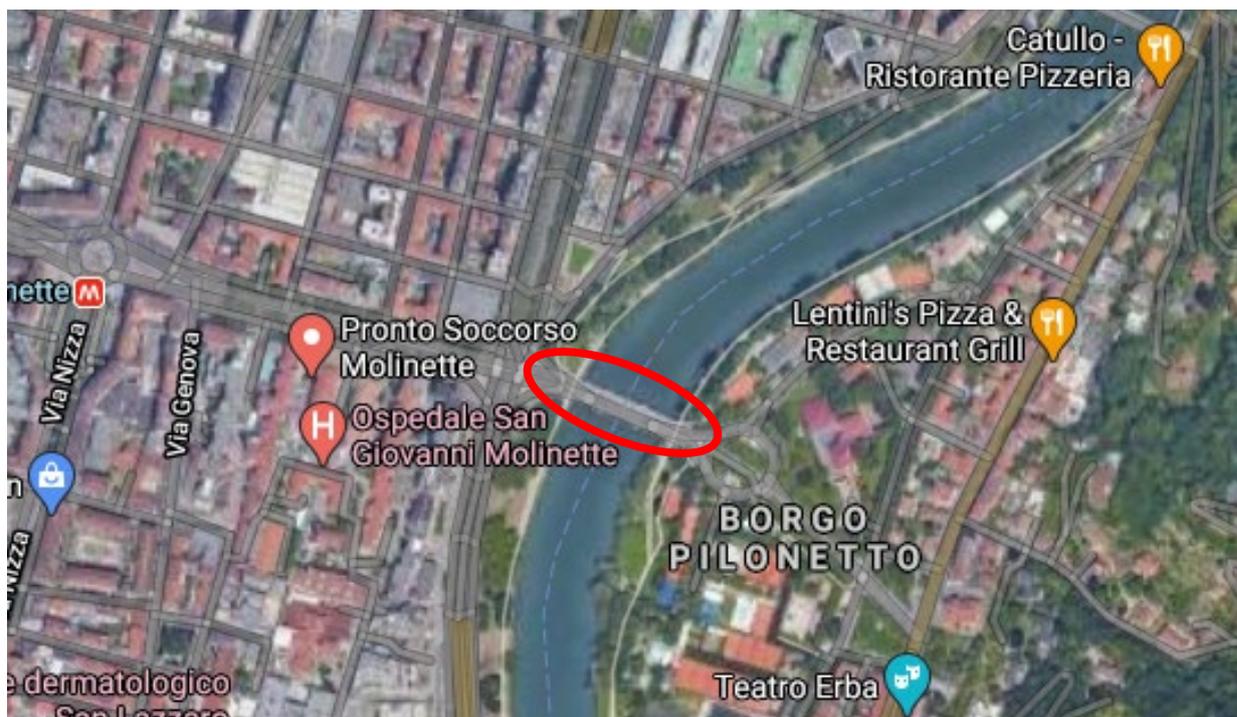


Figure 3.5: Localizzazione del ponte Franco Balbis

L'appalto per la realizzazione dell'opera fu bandito il 3 giugno del 1925 e prevedeva la partecipazione di numerose ditte italiane in grado di eseguire costruzioni in cemento armato. A vincere la gara fu l'impresa Porcheddu, azienda molto nota all'epoca, che presentò tre proposte suggerite da tre architetti differenti sulla base di un'unica struttura i cui calcoli furono effettuati dall'ingegner Mario Dezzutti. Dopo numerose valutazioni, la commissione scelse la soluzione proposta da un giovane architetto Italiano: Giuseppe Pagano.

Il completamento del ponte Balbis si ebbe verso la fine del 1927 ma l'inaugurazione avvenne nel 1928 per l'Esposizione Nazionale del decennale di Vittorio Veneto. Il nome originario del ponte fu dedicato al re Vittorio Emanuele III, per poi essere cambiato a seguito della caduta della monarchia e nel 1945 il ponte venne dedicato a Franco Balbis, medaglia d'oro per essersi distinto nei combattimenti militari, caduto per la libertà. Ad oggi il ponte costituisce un elemento di raccordo fondamentale in una delle aree maggiormente trafficate di Torino.

Il ponte Franco Balbis si compone di tre arcate policentriche uguali fra loro. La lunghezza totale dell'opera è di 147 metri e la larghezza è di 20 metri, di cui la carreggiata è larga 14 metri e il restante è costituito dall'area pedonale. Ogni arcata ha una luce di 38,30 metri. La sovrastruttura del ponte è costituita da una soletta di sostegno del piano stradale che presenta graticci di nervatura solo a livello dell'impalcato. La sovrastruttura è collegata alle arcate mediante pilastri di sezione trasversale identica. A loro volta, le arcate sono collegate alle fondazioni attraverso pile. La carreggiata presenta due corsie per senso di marcia in direzione Corso Moncalieri, e una corsia per senso di marcia Nizza e Lingotto. La struttura del ponte è interamente in cemento armato, mentre il paramento esterno ed i parapetti furono ricoperti di pietra artificiale a base di graniglia di marmo verde. Il coronamento dei parapetti è invece in Calcare di Nabresina. Sono presenti anche dei motivi decorativi come ad esempio lesene e terrazzini semiesagonali che sovrastano i rostri e le spalle, e stemmi in chiave di ogni arcata.



Figure 3.6: Ponte Balbis - Pavimentazione



Figure 3.7: Ponte Balbis - Panoramica

Nel novembre del 2003 la Città Metropolitana di Torino, ordinò una serie di interventi di manutenzione straordinaria per il ponte Balbis, a causa di una situazione di dissesto.

3.2 DOCUMENTAZIONE DI PARTENZA

Durante il lavoro di tesi si sono sfruttati: i disegni cartacei conservati nell'archivio Porcheddu, la documentazione fornita da Città Metropolitana di Torino e un precedente modello BIM del ponte Balbis.

L'**archivio Porcheddu** è situato nel dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino, nel quale è conservata la documentazione relativa al ponte Franco Balbis, comprendente disegni, fogli di calcolo e relazioni tecniche. Giovanni Antonio Porcheddu fu un ingegnere Italiano conosciuto per l'attività svolta dalla sua impresa, che ha diffuso la nuova tecnica del calcestruzzo armato "Sistema Hennebique" in Italia nel 1900. Il "Sistema Hennebique" è relativo al conglomerato cementizio armato con profilati di ferro disposti e rafforzati con delle staffe. La tecnica si definisce "cemento armato" e venne ideata e brevettata nel 1892 dall'ingegnere francese François Hennebique. A Porcheddu si deve la concessione esclusiva per l'applicazione del brevetto in Italia nello stesso anno in cui venne ideato. Si trattava di un metodo innovativo per i tempi tanto che fu oggetto di numerose critiche e perplessità da parte di altri progettisti contemporanei, ma che l'ingegnere si propose di portare avanti nonostante tutto. I risultati ottenuti con l'utilizzo di tale tecnica furono sensazionali. L'impresa costruì numerose opere a Torino e in diverse città d'Italia; tra queste la più importante fu il ponte del risorgimento a Roma tra il 1909 e il 1911 sul Tevere. Tra gli altri lavori più significativi si ricordano ad esempio i silos granari del porto di Genova, il ponte Duca degli abruzzesi sulla Dora a Torino ecc. ecc. In particolare, dai disegni cartacei dell'archivio Porcheddu sono stati caratterizzati gli elementi strutturali e non, che compongono il ponte e si sono ottenute informazioni riguardo: geometria, materiale e disposizione armature.

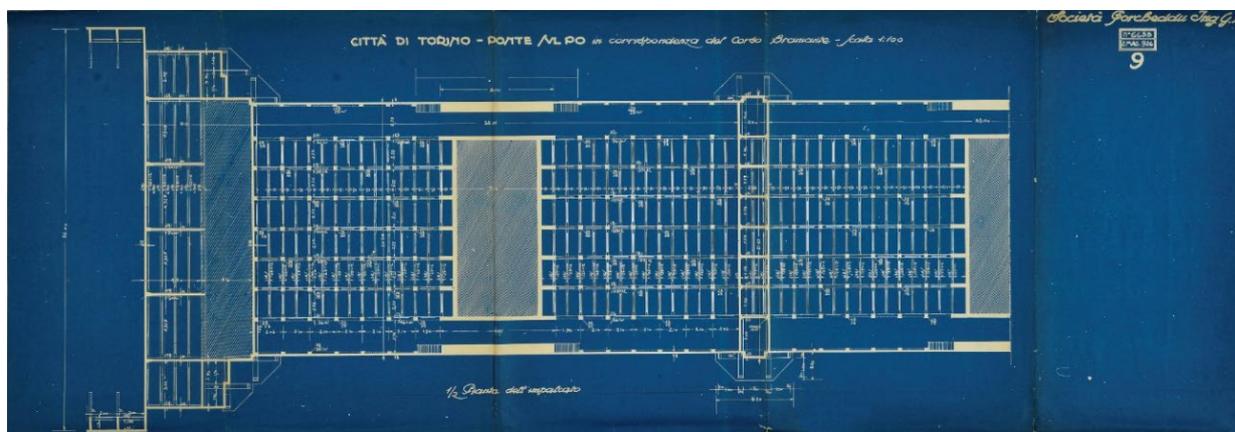


Figure 3.8: Disegno cartaceo dall'archivio Porcheddu

Il ponte Balbis è localizzato in ambiente urbano per cui la gestione è affidata alla Città Metropolitana di Torino che nel novembre del 2003 ordinò una serie di interventi di manutenzione straordinaria per ordinò una serie di interventi di manutenzione straordinaria. La **documentazione presentata da Città Metropolitana** consisteva in tre elaborati principali tra cui il rilievo strutturale, la relazione di calcolo dopo l'intervento in progetto e l'analisi della situazione strutturale (a quel tempo attuale) del ponte. Il rilievo strutturale consisteva in una serie di fascicoli riguardanti: elaborati grafici di rilievo (piante, prospetti, sezioni longitudinali e trasversali), indagini sui materiali, scheda di controllo strutture e scheda del ponte. Le indagini effettuate due situazioni di dissesto strutturale, sostanzialmente tra loro indipendenti:

- una diffusa situazione di corrosione delle armature metalliche, con conseguente rigonfiamento delle barre corrose, fessurazione ed in qualche caso espulsione del copriferro;
- la plasticizzazione del ferro di armatura e la disgregazione del calcestruzzo delle travi longitudinali di impalcato in prossimità dei giunti in soletta presenti alle estremità della campata centrale, lesioni passanti nei timpani e nella soletta dei marciapiedi in prossimità delle pile della campata centrale.

A tale quadro si aggiungevano alcuni dissesti di minore entità ed importanza che, pur avendo origine strutturale, interessavano elementi non portanti quali il parapetto in calcestruzzo armato ed il suo coronamento in pietra. Le finiture del ponte erano soggette a lesioni e sconessioni in corrispondenza del parapetto e del suo rivestimento, a sbrecciatura per compressione del coronamento e a lesioni nella pavimentazione stradale.

La prima situazione interessava tutta la struttura dell'impalcato cioè pilastri, travi longitudinali e trasversali e soletta. Le volte portanti invece erano esenti dalla problematica. La presenza del fenomeno era evidente sia maniera diretta, in quelle zone in cui le barre ossidate ed il successivo rigonfiamento avevano portato all'espulsione del copriferro, sia in maniera indiretta a seguito della comparsa di macchie di ruggine e di fessurazioni con andamento parallelo alle barre dovuto ad un fenomeno di rigonfiamento delle barre ossidate la cui entità però non era ancora in grado di provocare il distacco del copriferro.



Figura 3.5: Espulsione del copriferro causata dal rigonfiamento di un'armatura ossidata



Figura 3.6: Affioramento di macchie di ruggine

Tale situazione di dissesto strutturale era stata confermata anche dai risultati delle misure del grado di alcalinità del calcestruzzo mediante reazione della fenolftaleina. Nel fascicolo 'Indagini sui materiali' infatti, erano riportati valori di pH inferiori a 9 per gli elementi dell'impalcato per profondità superiori al copriferro delle armature e addirittura per la totalità dello spessore in alcuni pilastri. Per quanto riguardava invece le volte portanti, i valori rispecchiavano quanto dedotto dalle ispezioni visive con valori di pH inferiori a 9 solamente nella zona compresa tra 0,5 e 1 cm. Il fenomeno che avveniva era quello della carbonatazione che consiste nella penetrazione dell'anidride carbonica dell'aria all'interno del calcestruzzo attraverso i suoi micropori e al successivo innescarsi di reazioni chimiche con l'idrossido di calcio presente nella pasta cementizia. Tali reazioni producono un abbassamento del pH del materiale che va al di sotto del valore soglia (pH=9) che garantisce la passivazione e la protezione delle armature. Vi sono poi altri fattori che incidono sullo sviluppo della corrosione come ad esempio la presenza di umidità e di ossigeno. Questi elementi erano presenti entrambi all'interno dell'ambiente del ponte Balbis e questo spiegava ai tecnici come il fenomeno di ossidazione era iniziato ed aveva incrementato la sua velocità di sviluppo a causa della formazione di fessurazioni che favorivano l'ingresso di agenti aggressivi. L'ispezione aveva anche evidenziato come alcuni pilastrini avessero già subito interventi di riparazione e protezione superficiale ma che questo non li aveva resi esenti dalla corrosione in atto sulla struttura.

Per quanto riguarda la seconda situazione, la relazione fornita riporta che al momento della costruzione erano stati predisposti due giunti nell'impalcato, situati in corrispondenza delle pile adiacenti alla campata centrale. Nel corso delle ispezioni però venne accertato come in realtà tali giunti riguardassero esclusivamente la soletta dell'impalcato interrotta completamente. Il giunto non interessava invece le travi longitudinali le quali risultavano continue per tutta la lunghezza dell'impalcato e che erano solidali ai setti longitudinali della pila. Le

travi poste in corrispondenza dell'interruzione della soletta erano profondamente dissestate con fenomeno di disgregamento evidente del calcestruzzo e probabile snervamento delle armature. Altre ispezioni mostravano poi segni di scorrimento tra le travi longitudinali ed i setti della pila ad essi paralleli e frontali su cui si appoggiano, e fenomeni di mutuo movimento tra la soletta e il setto frontale della pila molto evidenti in corrispondenza del cunicolo impianti sottostante ai marciapiedi. Le lesioni proseguivano poi nel timpano con andamento circa verticale.



Figure 3.7: Segni di scorrimento tra trave longitudinale e setto frontale della pila

Per quanto riguarda le numerose lesioni e sconessioni esse erano una conseguenza dei movimenti dell'impalcato dovuti sia al ritiro ed alle deformazioni termiche, sia alla viscosità del calcestruzzo sotto i carichi permanenti. Le sbrecciature degli angoli del coronamento dipendevano dall'assunzione di compressioni per collaborazione del parapetto stesso con l'impalcato e dalla perfetta lavorazione delle pietre stesse che ai tempi furono poste a diretto contatto tra loro senza l'interposizione di giunti di malta la cui deformabilità avrebbe smorzato le compressioni.



Figura 3.8: Dissesti del parapetto in corrispondenza delle lesioni del timpano



Figura 3.9: Sbriciature per compressione del coronamento in pietra

Infine, furono riscontrate anche numerose lesioni nella pavimentazione stradale da attribuire alle interruzioni della soletta realizzate all'atto della costruzione con funzione di giunti di dilatazione. Poiché nella pavimentazione non furono

predisposti giunti, queste interruzioni si traducevano all'estradosso in fessure trasversali che interessavano tutta la carreggiata. L'intervento in progetto si preoccupava dunque di eliminare le anomalie esistenti nell'impalcato del ponte che riguardava i giunti parziali di dilatazione. Con l'intervento i giunti vennero regolarizzati e resi efficaci. Inoltre, vennero ripristinati i parapetti, il coronamento esterno ed anche la pavimentazione.

All'interno del documento contenente l'analisi strutturale della situazione allora attuale dell'infrastruttura, viene presentato il modello di calcolo adottato. In particolare, era stato costruito un modello di calcolo agli elementi finiti (F.E.M.) partendo dalla geometria del progetto originale. Tale modello conteneva al suo interno elementi di tipo lastra-piastra (SHELL) ed elementi di tipo trave (BEAM) andando così a formare un sistema di elementi e nodi.

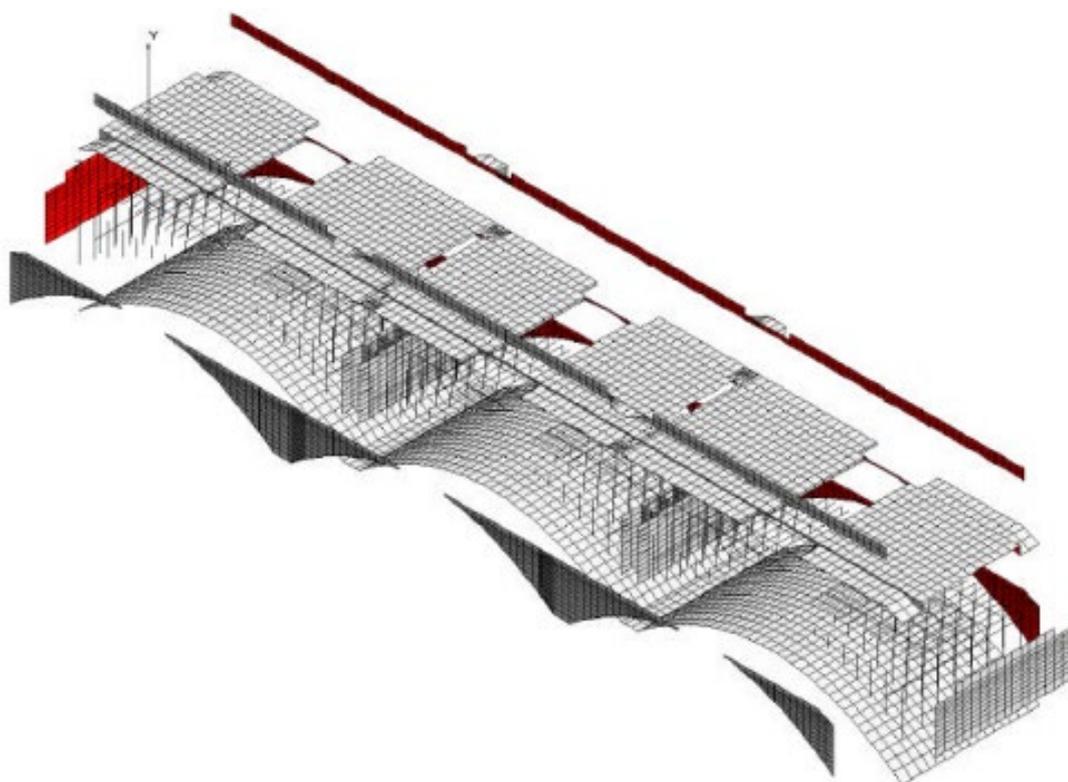


Figura 3.10: Modello utilizzato per lo studio dello stato di fatto e del processo fessurativo

I valori delle caratteristiche meccaniche dei materiali assunti nell'analisi erano stati dedotti principalmente dai risultati delle prove effettuate sui provini dei materiali e vengono riportati nella seguente tabella.

CARATTERISTICA MECCANICA	VALORE
Coefficiente di dilatazione lineare	$1.2e^{-5}$ m/m°C
Modulo di Young	25450 MPa
Coefficiente di Poisson	0.15
Massa volumica	2500 Kg/m ³

Tabella 6.1: Caratteristiche meccaniche

Per riprodurre il processo di formazione delle fessure era stata creata una sequenza di modelli la cui non linearità meccanica era presa in considerazione tramite il cambiamento delle condizioni cinematiche. Partendo dunque dalla situazione zero in cui il ponte non presentava fessure si arrivava alla situazione finale, e allora attuale, in cui le fessure presenti sui timpani raggiungevano un punto stabile. Le analisi effettuate avevano consentito di individuare le cause delle fessurazioni nel contemporaneo effetto del ritiro e del peso proprio della struttura.

Infine, all'interno del documento contenente la relazione di calcolo dopo l'intervento effettuato sulla struttura, è possibile notare come le anomalie esistenti nell'impalcato del ponte al momento dell'ispezione venivano eliminate. I giunti di dilatazione parziali posti alle estremità della campata centrale venivano regolarizzati e resi efficaci con conseguente riduzione degli stati tensionali dovuti alle deformazioni impresse. Inoltre, tra gli interventi di manutenzione straordinaria erano previsti anche degli interventi specifici ad alcuni elementi strutturali e non, in particolare sono stati costruiti nuovi pilastrini nella campata centrale (rispetto al progetto originario è stata cambiata sia la sezione che l'armatura presente) e degli interventi di ripristino riguardanti il paramento esterno e il bordo intradossale delle arcate, i quali sono stati fatti sia per la campata centrale che per quelle laterali.

Quindi, dalla documentazione fornita dalla Città Metropolitana di Torino è possibile evincere la geometria, il materiale e la disposizione delle armature per gli elementi che hanno subito delle modifiche, le caratteristiche meccaniche del materiale e le ipotesi fatte per la costruzione del modello agli elementi finiti.

Il ponte Balbis è stato oggetto di una precedente tesi "***La digitalizzazione delle infrastrutture esistenti con metodologia BIM: il caso del ponte Franco Balbis***" (Masciarelli, 2020), della quale si disponeva di un modello digitalizzato del ponte Balbis in *Autodesk Revit*. Lo scopo della tesi era quello di digitalizzare con la metodologia BIM un'infrastruttura viaria esistente e di elaborare un insieme di dati e parametri che serviranno a valutarne lo stato di fatto e a documentare la storia degli interventi effettuati su di essa, che è chiaramente diverso dall'obiettivo della presente tesi, ovvero quello di testare l'interoperabilità tra *Autodesk Revit* e un software di analisi strutturale. Per questo il modello *Autodesk Revit* da cui si è partiti, presentava molte limitazioni riguardo la metodologia utilizzata per la modellazione degli elementi che compongono il ponte, per ovviare a questo problema si è proceduto ad una ri-modellazione di questi elementi in modo tale che sia coerente con l'InfraBIM use definito.

Capitolo 4

METODOLOGIA INFRABIM APPLICATA AL CASO STUDIO

METODOLOGIA INFRABIM APPLICATA AL CASO STUDIO

4.1 WORKFLOW METODOLOGICO

Il seguente capitolo contiene una descrizione dettagliata della procedura con cui si è realizzato il modello del ponte Balbis adottando la metodologia BIM.

Il lavoro è stato svolto utilizzando due software presenti nel mercato: *Revit* per *Autodesk* e *SAP2000* per *CSI*.

Lo scopo della presente tesi è quello di testare l'interoperabilità tra strumenti per la digitalizzazione delle infrastrutture esistenti con metodologia BIM e strumenti per l'analisi strutturale, cercando di trovare e capire quali applicazioni possono risolvere i problemi pratici che vengono riscontrati e allo stesso tempo, trovare una soluzione per le criticità legate all'uso delle nuove tecnologie.

È importante specificare che per la modellazione, si è partiti dai disegni cartacei messi a disposizione dall'archivio Porcheddu del Politecnico di Torino e dal lavoro di una precedente tesi "La digitalizzazione delle infrastrutture esistenti con metodologia BIM: il caso del ponte Franco Balbis".

I disegni fanno riferimento al progetto esecutivo e contengono quasi tutte le informazioni necessarie alla realizzazione del modello. Tra questi disegni ci sono la pianta dell'impalcato, i prospetti, le sezioni, la distinta delle armature e alcuni prospetti dei dettagli costruttivi riguardanti il rivestimento in pietra del ponte. Essi ci hanno permesso di riprodurre la struttura del ponte ed alcuni suoi dettagli partendo dai semplici disegni cartacei.

Mentre, per quanto riguarda la tesi precedente, essa aveva come scopo quello di applicare una metodologia BIM per la digitalizzazione delle infrastrutture esistenti ed è stato preso come caso studio il ponte Balbis di Torino. Quindi, si aveva a disposizione un modello digitale completo del ponte, costruito in *Autodesk Revit*, in cui si erano riprodotti gli elementi strutturali essenziali del ponte quali arcate, pilastrini, spalle e pile, e alcuni degli elementi di rivestimento quali la pavimentazione e i parapetti. Ai fini dello scopo della presente tesi, il modello fornito non è risultato totalmente idoneo, in quanto la maggior parte degli elementi erano stati modellati con famiglie di *Autodesk Revit* a cui non era associato un

modello analitico e quindi non idonei per essere trattati in un software per l'analisi strutturale. Di conseguenza, gli elementi già presenti sono stati rimodellati e altri elementi sono stati integrati nel modello e quindi è stato raggiunto un livello di dettaglio maggiore.

Il software adottato inizialmente è stato *Autodesk Revit v21* per la costruzione del modello parametrico tridimensionale contenente informazioni e dati individuati nella documentazione di partenza, in particolare sono stati ri-modellati gli elementi uno per volta in modo tale che il modello fisico e il modello analitico siano coerenti al nostro InfraBIM use.

Il passaggio successivo è stato quello di esportare il modello in *SAP2000 v22* e ai fini di una maggiore interoperabilità tra i software, inizialmente, si è deciso di utilizzare il formato di scambio standard IFC. A questo punto si sono riscontrate enormi criticità (che verranno descritte nel capitolo successivo) relative allo scambio dei dati tra i due software che ha reso questo modo di scambio non adattabile al caso del ponte Franco Balbis.

Al fine di cercare di fornire soluzioni ai complessi problemi legati all'interoperabilità, è stato utilizzato un formato di scambio interno, il formato EXR. Questa possibilità di scambio, seppur consente un livello di interoperabilità molto alta e consente di esportare il modello senza compiere un salvataggio intermedio che potrebbe portare ad una perdita delle informazioni, inizialmente è stato tralasciata, perché permette solo uno scambio di dati tra i software utilizzati e necessità dell'installazione del plug-in. Attraverso lo studio delle criticità e delle possibilità che questo percorso offre, esso è risultato essere la soluzione migliore e quindi attraverso la creazione di un file .exr è stato generato il modello in *SAP2000*. A questo punto è stato analizzato il modello strutturale ed anche in questo caso sono state riscontrate delle limitazione, per cui il modello per essere idoneo ad una analisi strutturale necessita di un perfezionamento che deve essere fatto in *SAP2000*.

I risultati dell'interoperabilità verranno mostrati a conclusione dell'intero lavoro, fornendo una soluzione, con occhio critico, alle difficoltà incontrate.

Come riassunto nel workflow metodologico mostrato nel diagramma di flusso nella figura successiva, i passaggi necessari e principale per raggiungere il risultato voluto sono schematizzati.

WORKFLOW METODOLOGICO

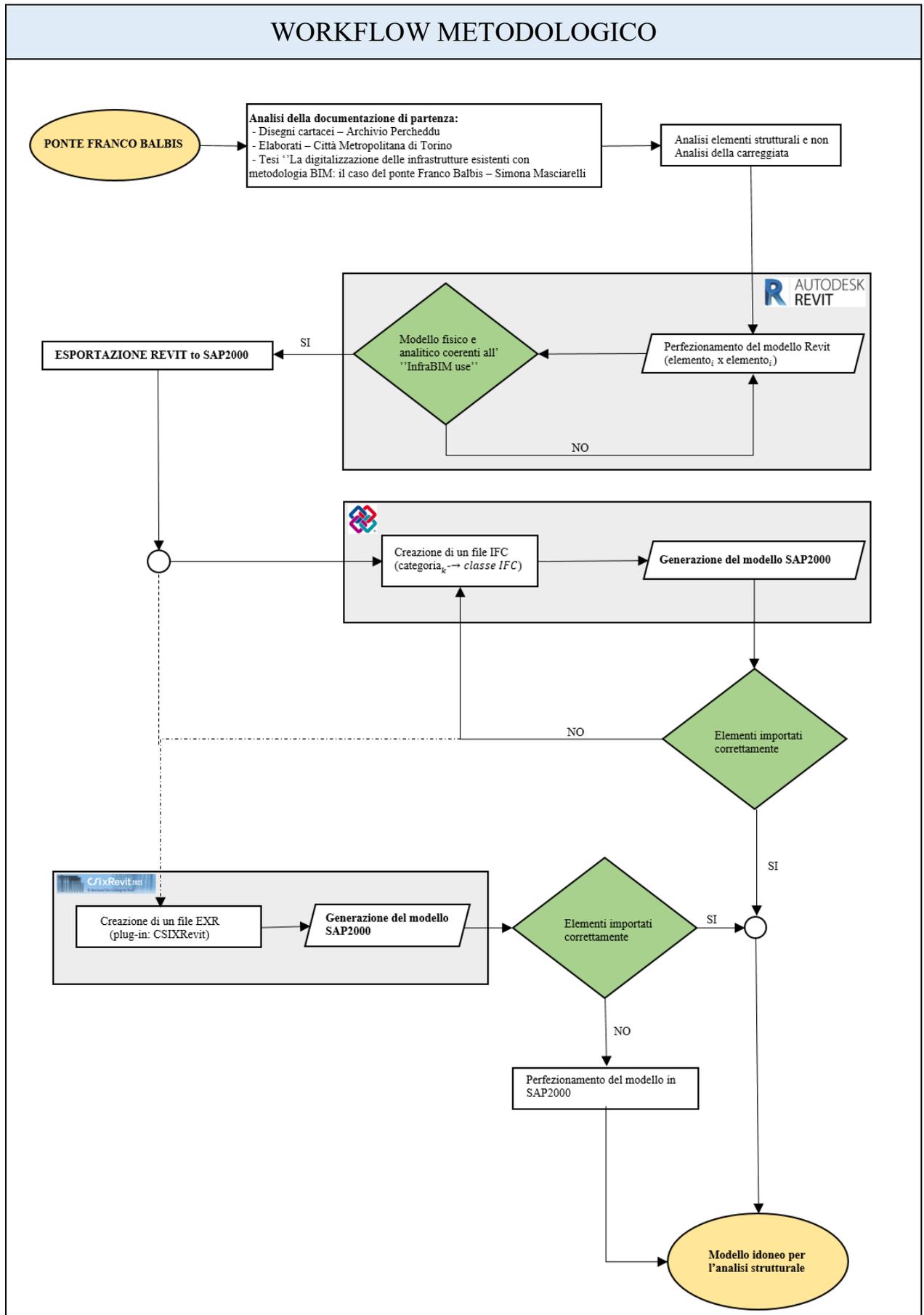


Figura 4.1: Workflow

4.3 MODELLAZIONE IN AUTODESK REVIT

A partire dalla precedentemente descritta documentazione si è generato il modello BIM con la versione per studenti di *Autodesk Revit 2021*.

Durante lo sviluppo della tesi ho potuto sperimentare i numerosi vantaggi della metodologia BIM per la modellazione degli elementi strutturali. In particolare per lo svolgimento della tesi si sono sfruttate tre potenzialità offerte dal software, *Autodesk Revit* consente di aggiungere tutti i parametri di cui si ha bisogno per aumentare il livello di informazione contenuto nel modello; fornisce la possibilità di attivare o disattivare il modello analitico per gli elementi, il modello analitico è la rappresentazione che viene esportata sul software di analisi strutturale e permette di associare ad ogni elemento una fase di costruzione così che il solo modello *Autodesk Revit* contenga tutte le informazioni necessarie .

Per procedere con la modellazione bisogna innanzitutto definire il sistema di griglie e livelli per l'inserimento degli elementi che formano il ponte.

I livelli e le griglie sono piani circoscritti che consentono di definire il contesto del progetto. Per quanto riguarda i livelli, essi sono utili alla definizione del modello tridimensionale in quanto danno indicazioni circa l'elevazione in quota di ciascuna parte dell'opera. Nel caso in esame i livelli inseriti sono stati inizialmente dieci, a ciascuno dei dieci livelli è stato possibile assegnare un valore di quota specifico ed un nome:

- LIVELLO 3 – Piano superiore pilastri (quota 228.55 m);
- LIVELLO 6 – Fine spalle (quota 228.25 m);
- LIVELLO 9 – Piano superiore arcata (quota 223.34 m);
- LIVELLO 12 – Fine pila (quota 221.13 m);
- LIVELLO 10 – Piano inferiore arcata (quota 220.68 m);
- LIVELLO 11 – Inizio arcata (quota 217.78 m);
- LIVELLO 14 – Piano inferiore muro di base (quota 215.76 m);
- LIVELLO 15 – Piano di posa spalla (quota 213.80 m);
- LIVELLO 16 – Piano di posa plinto (quota 212.90 m);
- LIVELLO 18 – Piano di posa fondazioni (quota 208.60 m);

Successivamente, sono stati aggiunti altri livelli in fase di sviluppo per collocare gli elementi di dettaglio.

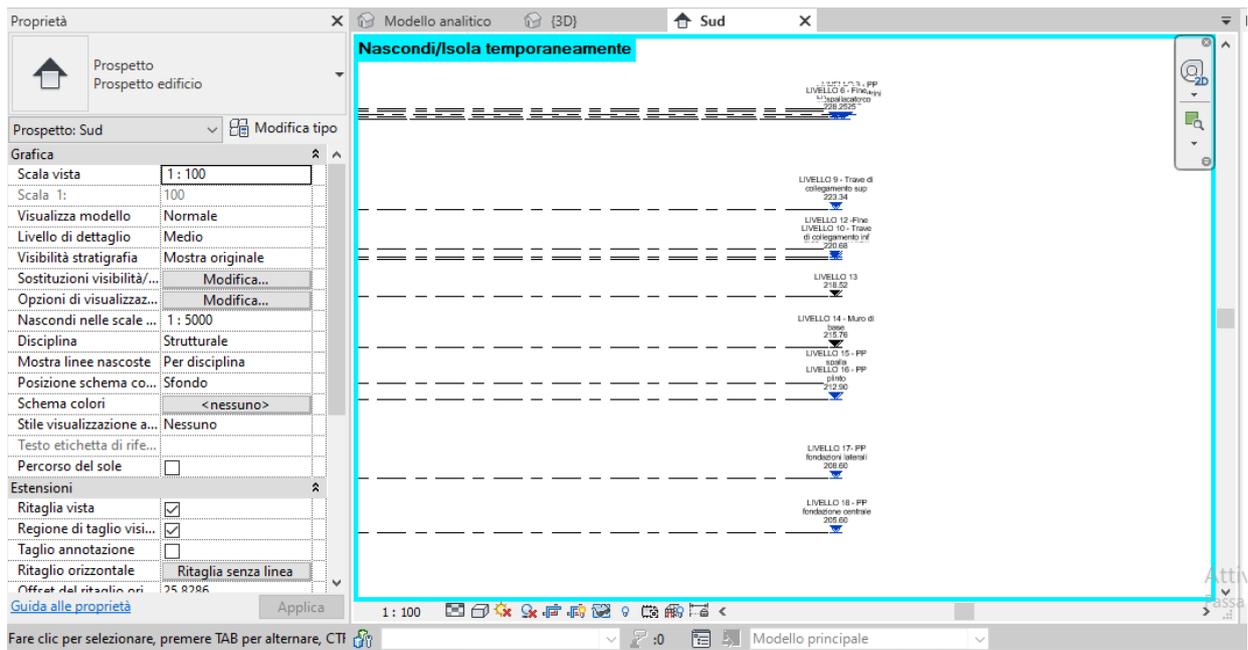


Figura 4.2: Posizionamento dei livelli di riferimento

Le griglie sono elementi di annotazione che semplificano l'organizzazione del progetto. In particolare, queste sono state posizionate in corrispondenza delle rette passanti per i centri dei pilastri in modo da facilitare successivamente l'aggiunta dei pilastri lungo le linee della griglia. In *Autodesk Revit* le singole griglie vengono numerate automaticamente per avere un riferimento nelle diverse viste. Per evitare confusione nella visualizzazione, le etichette contenenti la numerazione delle griglie sono state nascoste nella vista riportata di seguito.

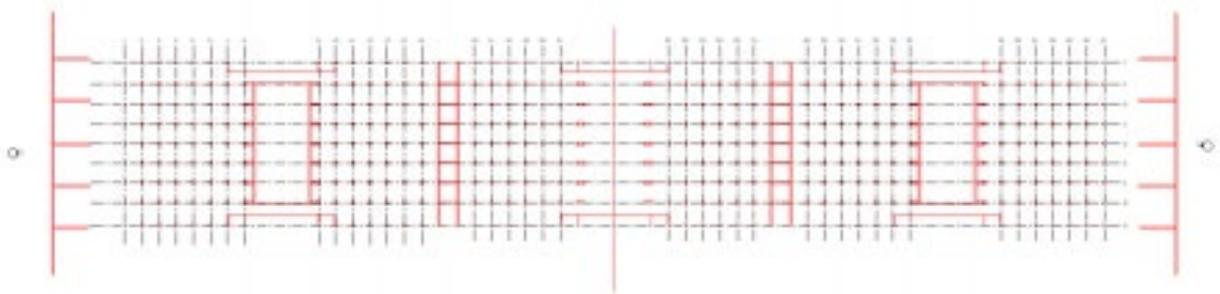


Figura 4.3: Posizionamento delle griglie

Modellazione dei pilastri

I pilastri presenti all'interno dell'opera infrastrutturale sono 378 e sono tutti di sezione rettangolare con dimensione pari a:

- 280x280 mm, per i pilastri delle campate laterali;
- 300x650 mm, per i pilastri della campata centrale.

E' bene evidenziare che i pilastri della campata centrale hanno subito degli interventi in seguito alla manutenzione straordinaria che è stata fatta nel 2003, in particolare la sezione dei pilastri è stata variata da 280x280 mm a 300x650 mm. *Autodesk Revit* permette di definire delle fasi di creazione per cui il modello permette di estrarre e visualizzare entrambi le fasi, quella di costruzione e quella attuale.

La libreria di *Revit* contiene al suo interno la famiglia caricabile “*Colonna Strutturale*”, in cui ciascun elemento è dotato di forma e dimensioni precise (tipo) per cui è stato necessario adattare tali elementi al caso studio. Nel caso specifico, sono stati creati due nuovi tipi di Colonna Strutturale: “Pilastro rettangolare 28x28cm” e “Pilastro rettangolare 30x65cm”. Creato il tipo bisognava collocarlo all'interno del modello, e si è scelto di posizionare i pilastri all'intersezione delle linee che costituiscono il grigliato, mentre per la corretta collocazione in altezza sono stati assegnati due vincoli: si è scelto il livello “LIVELLO 3 – Piano superiore pilastrini” come vincolo per la parte superiore della colonna e il livello “LIVELLO 11 – Inizio arcata” come vincolo per la base della colonna.

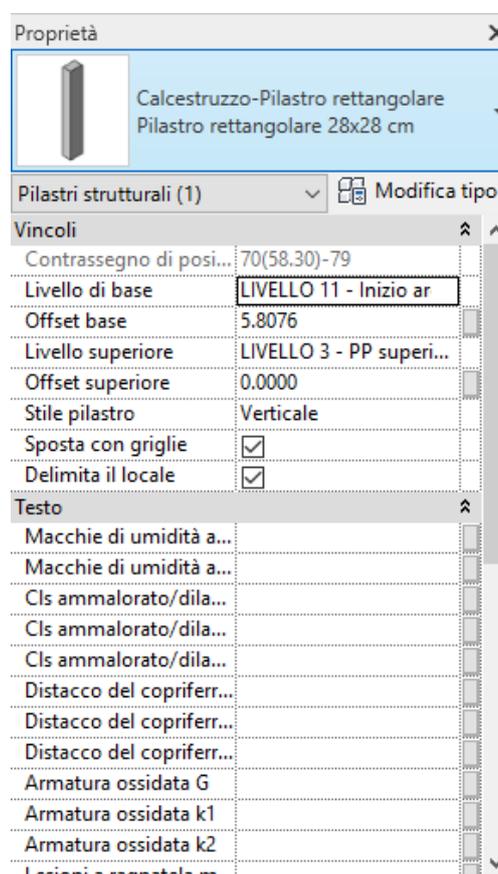


Figura 4.4: Proprietà pilastro

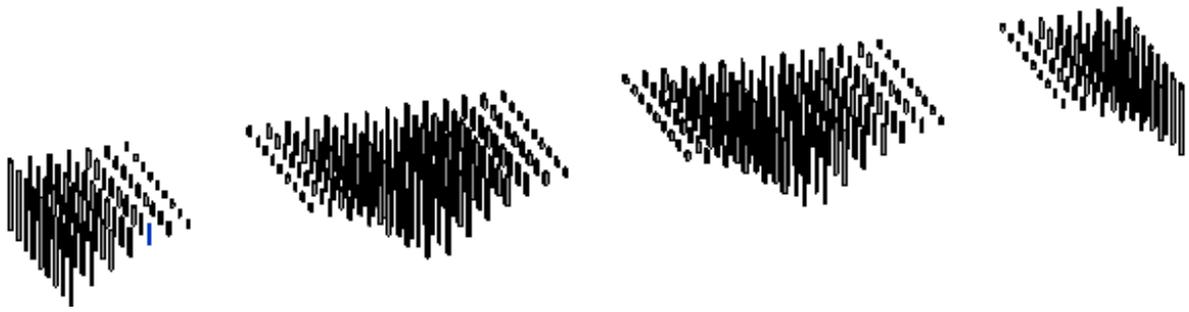


Figura 4.5: Modello fisico - disposizione dei pilastri

Per quanto riguarda il modello analitico, i pilastri sono stati modellati volutamente in modo tale che la loro rappresentazione analitica è un elemento di tipo trave e la loro posizione è nel baricentro geometrico dell'elemento tridimensionale.

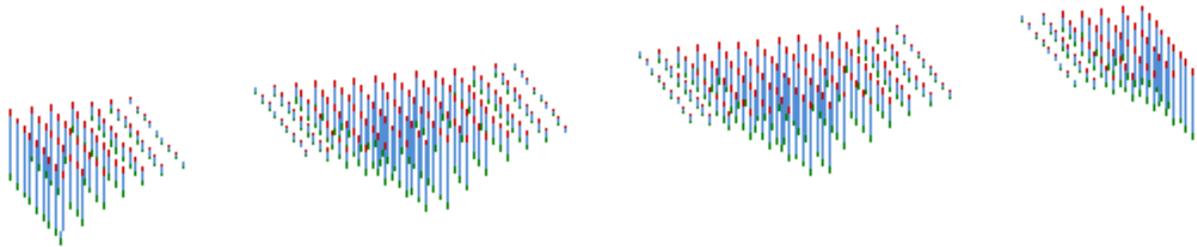


Figura 4.6: Modello analitico - disposizione dei pilastri

Modellazione delle travi

Le travi non sono state ri-modellate in quanto erano idonee allo scopo della presente tesi, esse sono state ottenute dalla famiglia di sistema “*Trave strutturale*” e presentano una sezione pari a:

- Trave 12x47 cm;
- Trave 14x47 cm;
- Trave 16x50 cm;
- Trave 18.5x50 cm;
- Trave 18x47 cm;
- Trave 23x47 cm;
- Trave 28x16 cm;
- Trave 28x18 cm;
- Trave 28x47 cm;
- Trave 28x50 cm;
- Trave 30x60 cm;
- Trave 40x80 cm.

Ogni tipo di trave è stato editato secondo le esigenze del progetto e rinominato sulla base delle dimensioni dei dodici tipi di trave presenti nella struttura.

Per quanto riguarda la loro collocazione, esse sono state inserite al livello “LIVELLO 3 – Piano superiore pilastrini”.

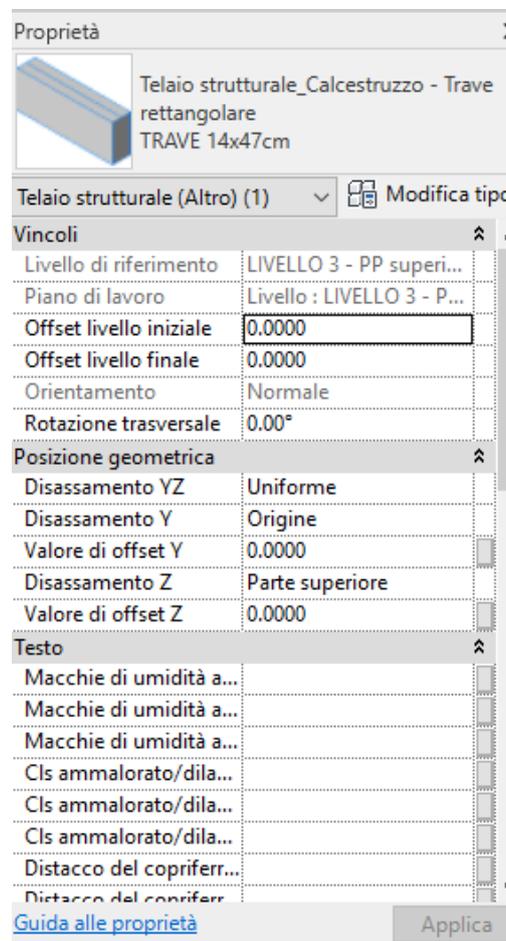


Figura 4.7: Proprietà trave

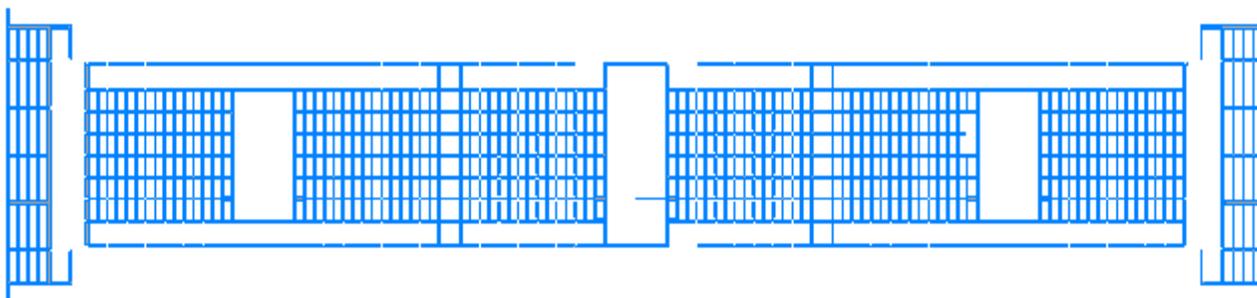


Figura 4.8: Modello fisico - disposizione delle travi

Per quanto riguarda il modello analitico associato all'elemento trave, esso è rappresentato attraverso un elemento di tipo trave, posizionato all'intradosso rispetto la loro effettiva ubicazione.

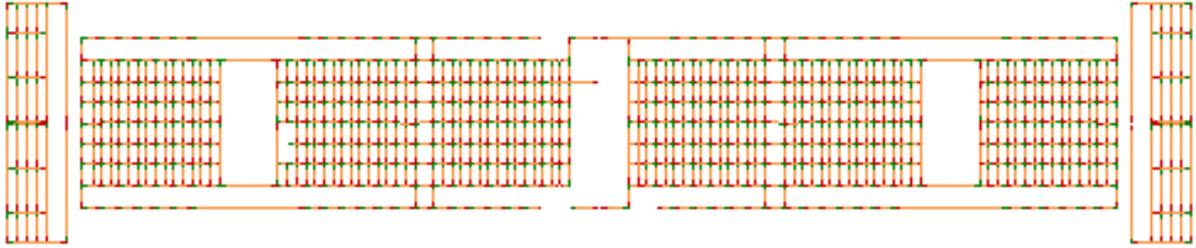


Figura 4.9: Modello analitico - disposizione delle travi

Modellazione del riempimento impalcato e della pavimentazione

Il riempimento della pianta di impalcato e la pavimentazione stradale sono stati realizzati utilizzando la famiglia di sistema “*Pavimento strutturale*”. Sono stati creati diversi tipi di pavimento e sono stati rinominati in funzione della loro ubicazione:

- *Pavimento generico 300 mm per impalcato*, rappresenta la pavimentazione della carreggiata, a cui è stata assegnato uno spessore di 300 mm e un’inclinazione a partire dal centro esatto della carreggiata come da elaborato progettuale;
- *Pavimentazione marciapiede*, rappresenta la pavimentazione dei marciapiedi, che presentano in questo caso una pendenza unica convergente verso il centro della carreggiata e uno spessore di 140 mm e sono leggermente sopraelevati rispetto alla parte della strada destinata alla circolazione veicolare e questo è dovuto ad un vincolo normativo circa la progettazione dei ponti destinati anche al transito pedonale;
- *Sottoriempimento*, rappresenta il riempimento tra la pavimentazione l’impalcato al di sotto della carreggiata;
- *Riempimento marciapiedi*, rappresenta il riempimento tra la pavimentazione l’impalcato al di sotto dei marciapiedi.

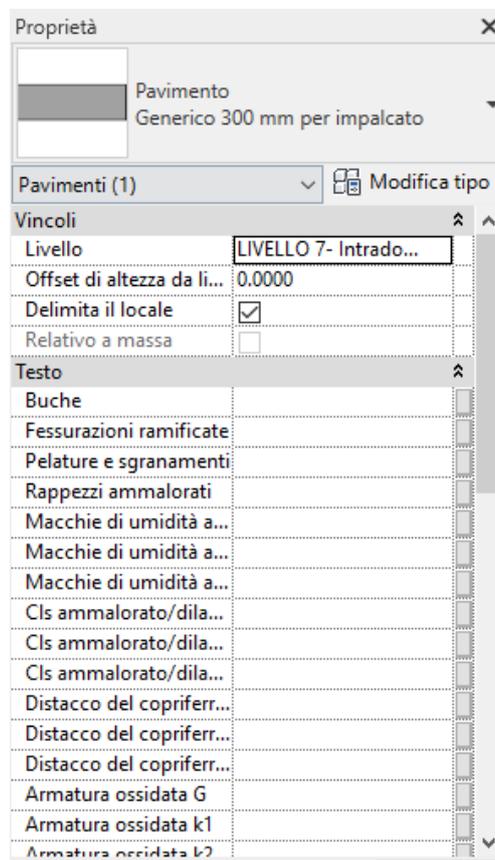


Figura 4.10: Proprietà pavimentazione

Inoltre, è importante evidenziare che non sono state rinvenute nei disegni delle informazioni riguardanti i singoli strati che costituiscono lo spessore totale della pavimentazione per cui è stata generata come un unico blocco.

Di seguito viene mostrato il risultato della modellazione completa della pavimentazione.

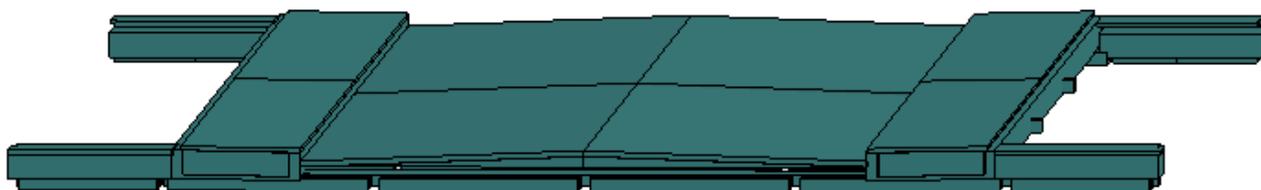


Figura 4.11: Modello fisico - pavimentazione e riempimento

Inoltre, la pavimentazione stradale e il riempimento dell'impalcato risultano essere degli elementi non strutturali, per cui è stato disattivato il loro modello analitico e quindi è stata disattivata la vista di calcolo dell'elemento.

Modellazione delle fondazioni

I disegni progettuali messi a disposizione dall'archivio, non forniscono delle informazioni dettagliate circa il quantitativo di armatura presente nelle fondazioni. Per tale motivo, le fondazioni sono state comunque modellate per ottenere una maggiore completezza del modello, ma è stato imposto un vincolo di incastro, in quanto non si avevano a disposizione tutte le informazioni utili per l'analisi strutturale.

Per modellare le fondazioni è stata scelta la famiglia caricabile *Fondazione strutturale metrica* e sono state create due tipologie di fondazioni come da elaborato progettuale: “*Fondazione centrale*” e “*Fondazione laterale*”. È importante inoltre evidenziare che attraverso l'uso della famiglia caricabile è risultato possibile creare un elemento la cui geometria della sezione risulta essere molto complessa. Creato il tipo di fondazione strutturale bisognava collocarlo all'interno del modello, si è scelto di posizionarle mediante l'assegnazione di un vincolo: il livello “LIVELLO 18 – Piano di posa fondazioni” rappresenta il vincolo per la base inferiore.

Inoltre, è bene osservare che la famiglia *Fondazione strutturale metrica* non presenta la rappresentazione analitica associata all'elemento fisico.

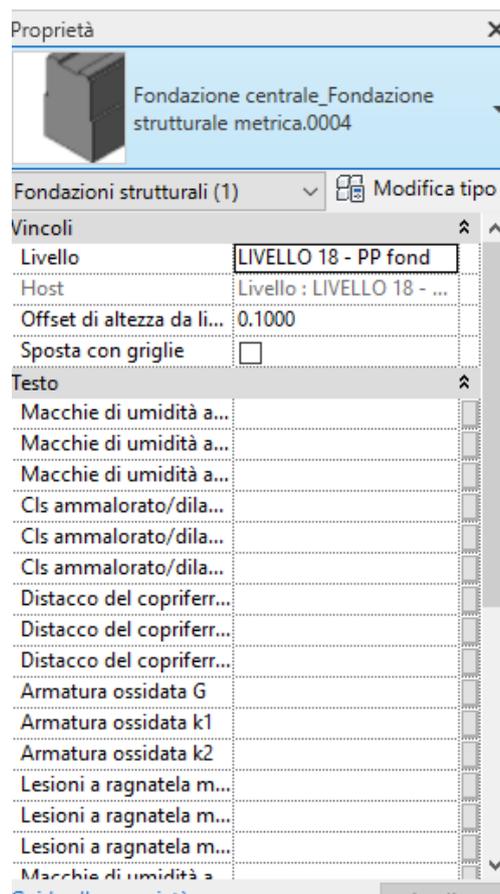


Figura 4.12: Proprietà fondazione

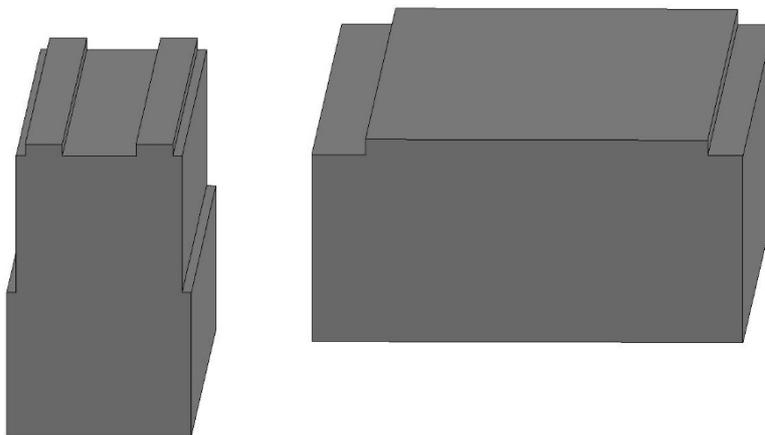


Figura 4.12: Modello fisico - fondazioni

Modellazione delle pile

La pila è quel componente strutturale che contribuisce a garantire il sostegno tra due arcate successive. Il ponte Balbis è composto da due pile di geometria complessa e che sono state modellate in *Autodesk Revit* con la famiglia caricabile “*Pilastro strutturale metrico*”. Anche in questo caso, l’utilizzo della famiglia caricabile ci ha permesso di aggirare l’ostacolo legato alla geometria complessa dell’elemento strutturale. Tale famiglia, nel progetto, è stata rinominata “*Pila_Pilastro strutturale*”.

Per la collocazione della pila è stato dato come vincolo di base e superiore il livello “LIVELLO 16 – Piano di posa plinto” ed è stato imposto un offset di 7.5 m per il livello superiore, che rappresenta l’altezza della pila.

In particolare, la geometria della pila presenta una sezione cava in entrambe le direzioni del piano, per questo inizialmente è stata realizzata una sezione piena e successivamente creando due più sezioni di vuoto è stata sottratta la parte che costituisce la cavità dell’elemento.

Di seguito viene mostrata una rappresentazione del risultato finale.

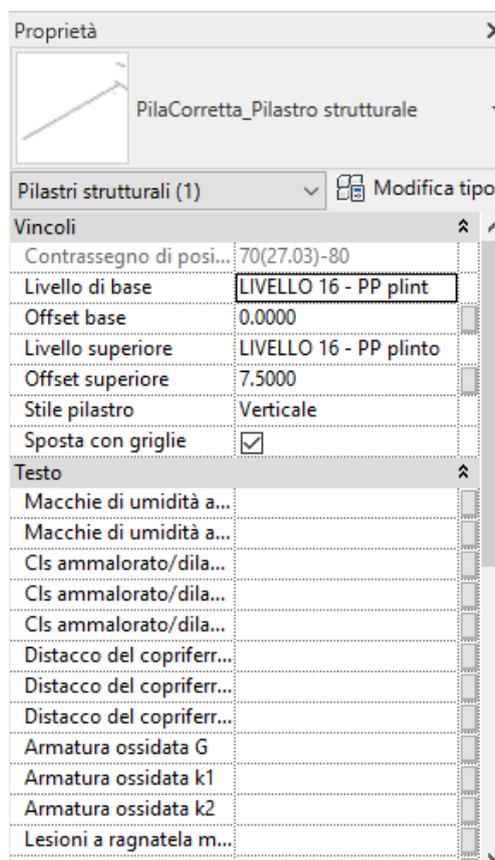


Figura 4.13: Proprietà pile

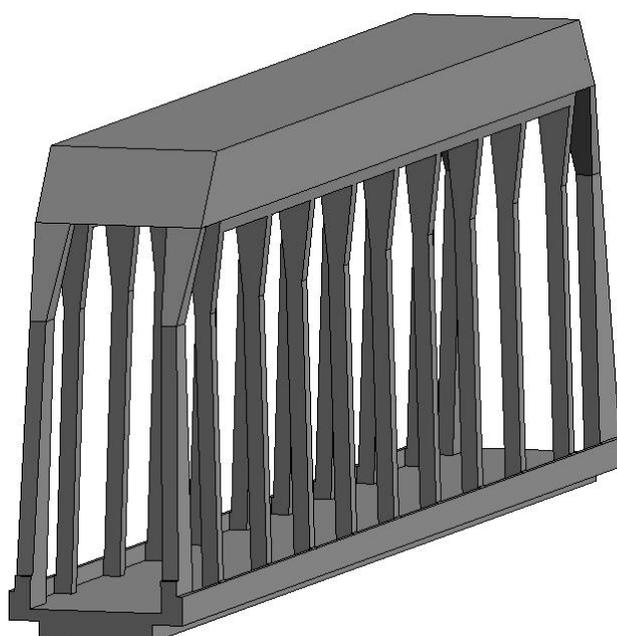


Figura 4.14: Modello fisico - pile

Per quanto riguarda il modello analitico associato alla pila, esso è rappresentato attraverso un elemento lineare di tipo trave, posizionato nel baricentro geometrico dell'elemento. Di seguito viene mostrata una rappresentazione.



Figura 4.15: Modello analitico - pile

Modellazione delle spalle e delle arcate

Sebbene *Autodesk Revit* sia uno strumento molto potente, si sono riscontrate delle difficoltà nella modellazione degli elementi strutturali la cui rappresentazione analitica deve essere un elemento bidimensionale. Per questo motivo, dopo molteplici prove, si è deciso di modellare tali elementi con la famiglia concettualmente più corretta.

In particolare, per le arcate si sono ottenuti risultati migliori con le famiglie: “Muro strutturale” e “Trave strutturale”. Dal punto di vista del modello fisico entrambe le tipologie hanno portato alla costruzione dell’elemento conforme allo stato di fatto, mentre per quanto riguarda il modello analitico si ha che alla famiglia caricabile “Trave strutturale” è associata una rappresentazione analitica di tipo trave (monodimensionale) e quindi non corretta, mentre alla famiglia di sistema “Muro strutturale” è associato un elemento analitico di tipo lastra – piastra (bidimensionale) ma associata alla superficie resistente sbagliata. A questo punto data l’impossibilità di modellare in *Autodesk Revit* l’elemento correttamente si è deciso di cercare delle soluzioni durante l’esportazione.



Figura 4.16: Modello fisico arcata – Famiglia: Trave strutturale



Figura 4.17: Modello fisico arcata – Famiglia: Muro strutturale



Figura 4.18: Modello analitico arcata – Famiglia: Trave strutturale



Figura 4.19: Modello analitico arcata – Famiglia: Muro strutturale

La spalla è quell’elemento che costituisce la struttura di sostegno terminale dell’arcata del ponte e del terrapieno laterale, per quanto riguarda la loro modellazione il discorso è analogo all’elemento precedente. I risultati migliori sono stati ottenuti con la famiglia: “Muro strutturale”. In particolare, la spalla del ponte è stata modellata utilizzando due Muri differenti che sono stati rinominati: “Muro spalla” e “Muro spalla sottile”, al fine di evitare la creazione della sezione vuota. Di seguito viene mostrata una rappresentazione del risultato finale.

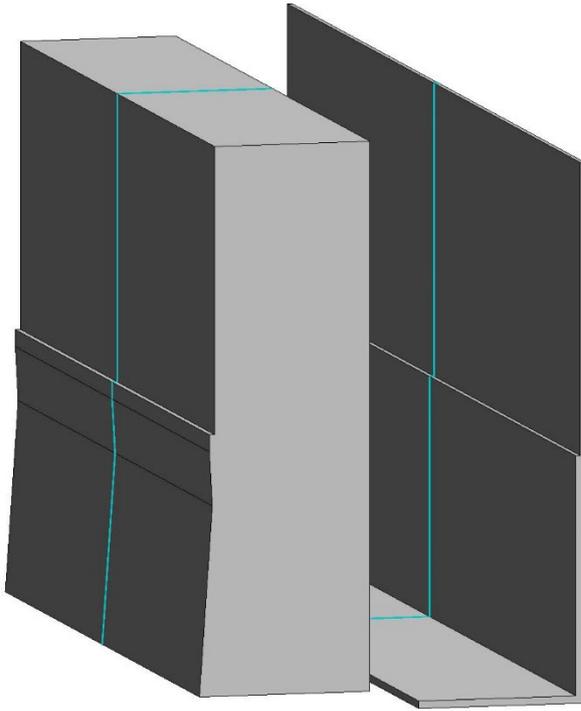


Figura 4.20: Modello fisico spalla

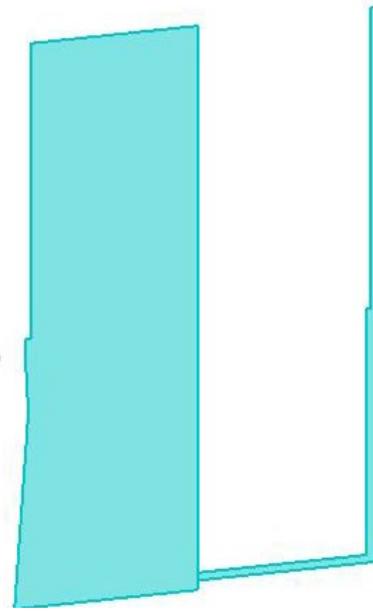


Figura 4.21: Modello analitico spalla

Modellazione dei parapetti

I parapetti non sono state ri-modellate in quanto erano idonei allo scopo della presente tesi. Il ponte Balbis è dotato di parapetti esterni al ponte e parapetti di protezione del marciapiede. Essi erano stati realizzati dalla famiglia di sistema “Muro strutturale”.

Tali elementi dato che risultano essere non strutturali è stato disattivato il loro modello analitico e quindi è stata disattivata la vista di calcolo dell’elemento.

Inoltre, è bene evidenziare che i parapetti di protezione del marciapiede sono costituiti da un muro in calcestruzzo pieno e da una ringhiera di ferro decorata, quest’ultimo elemento è stato trascurato in quanto il fine della tesi non è quello di raggiungere un elevato livello di dettaglio, ma creare uno strumento metodologico al fine di rendere idoneo il modello BIM all’analisi strutturale.

Con tale operazione si è conclusa la fase di modellazione del ponte oggetto di studio per questa tesi

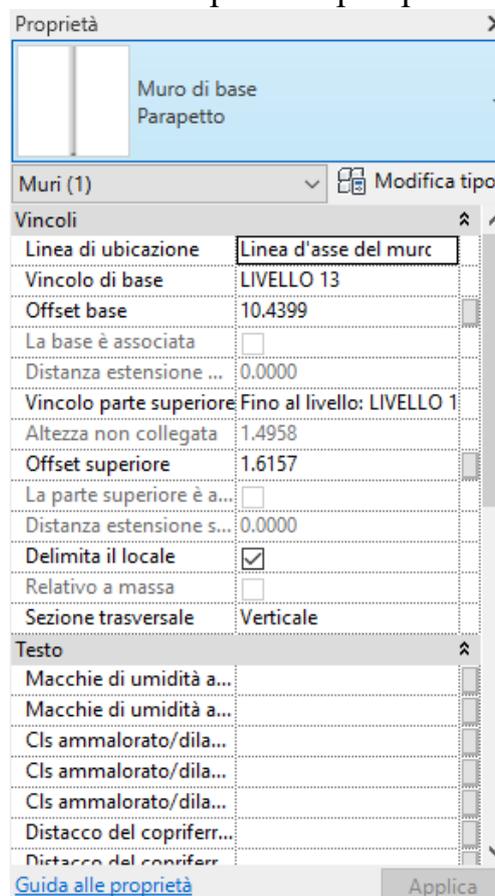


Figura 4.22: Proprietà dei parapetti

4.3 Analisi della modellazione InfraBIM

Di seguito vengono proposte delle immagini che mostrano il risultato assemblato e completo di tutti gli elementi di cui si è discusso fino ad ora.

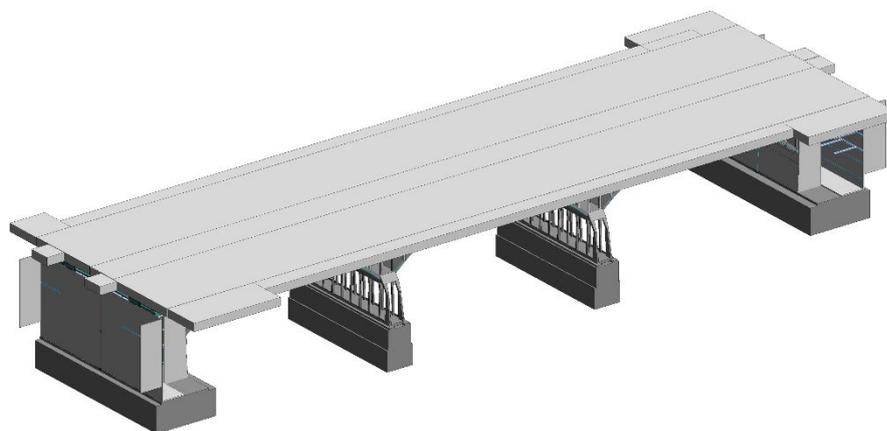


Figura 4.23: Modellazione completa - modello fisico

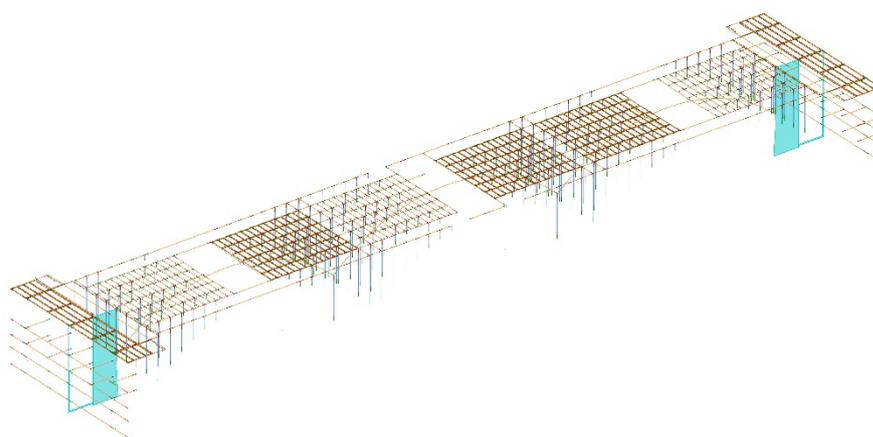


Figura 4.24: Modellazione completa - modello analitico

Dalle immagini, si può evincere la differenza tra modello analitico e modello fisico, il primo mira a ottenere un modello verosimile allo stato di fatto, mentre il secondo a schematizzare la struttura con una serie di nodi e aste, in modo tale che il progetto sia leggibile da un software di calcolo strutturale.

Come si può evincere dalle immagini relative alle proprietà degli elementi, *Autodesk Revit* permette l'inserimento di parametri al fine di aumentare il livello di informazione del modello. Infatti, erano stati definiti dei parametri atti a rappresentare lo stato di degrado degli elementi costituenti l'infrastruttura, tali parametri erano stati definiti nel lavoro di tesi precedente e si è deciso di mantenerli in modo tale che il modello creato contenga tutte le informazioni utili a valutare lo stato di fatto del ponte.

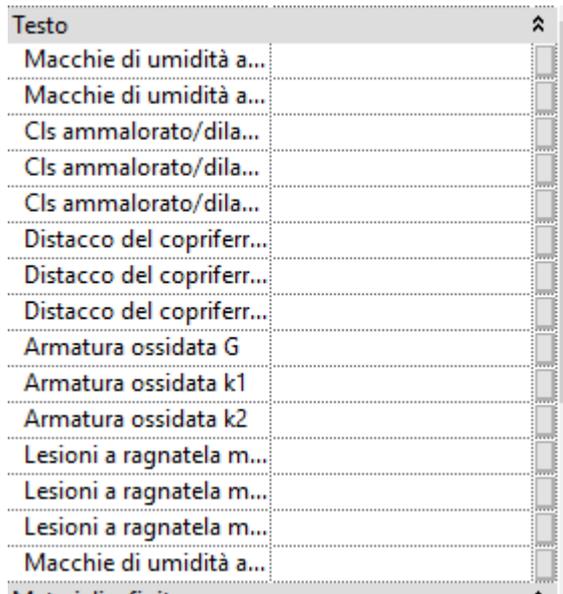


Figura 4.25: Parametri pila

Inoltre, *Autodesk Revit* permette la definizione del materiale. Nel caso studio in esame, è stato utilizzato un materiale strutturale presente nelle librerie: “Calcestruzzo – gettato in opera”, in quanto presenta le stesse caratteristiche del materiale di progetto. In particolare, per ciascun materiale, come si vede nell’immagine seguente, *Autodesk Revit* implementa cinque voci: identità, grafica, aspetto, fisico e termico.

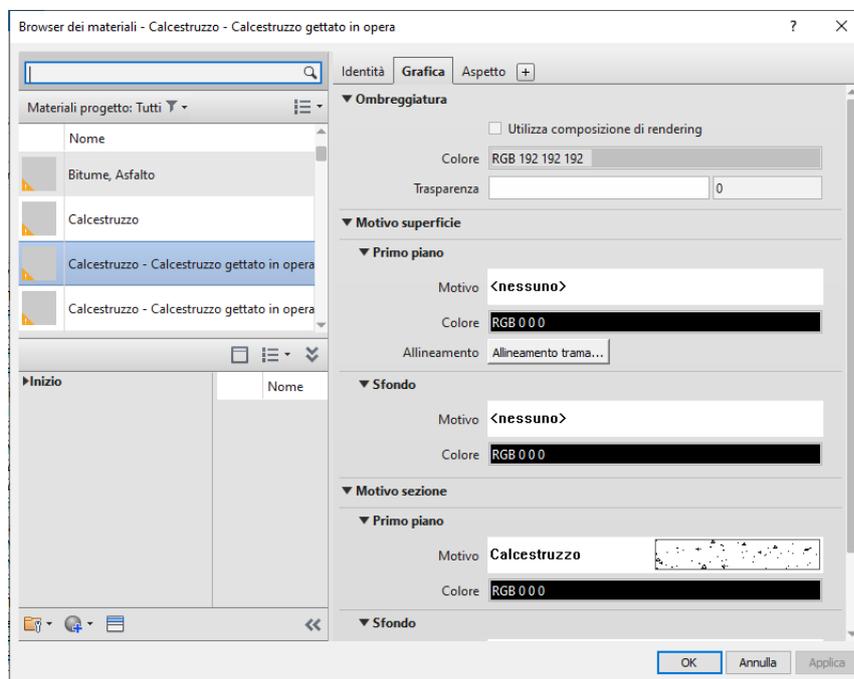


Figura 4.26: Proprietà materiale

La voce di maggiore interesse in ambito civile è il “Fisico” in cui si trovano le caratteristiche meccaniche e la densità del materiale.

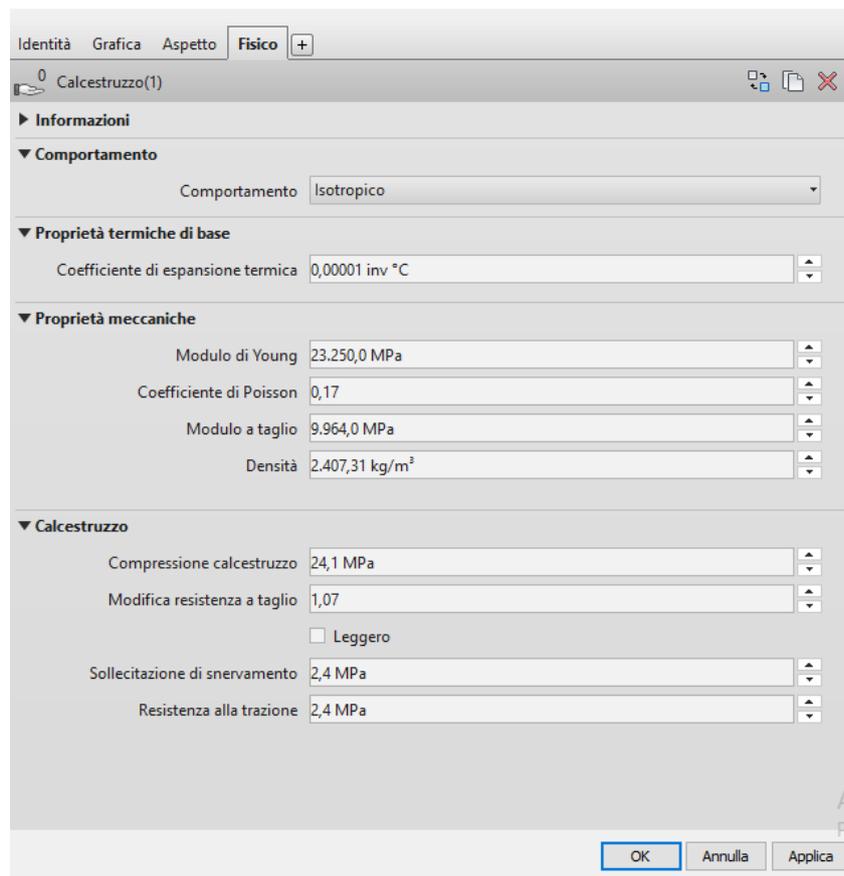


Figura 4.27: Proprietà meccaniche calcestruzzo gettato in opera

Durante lo svolgimento della tesi, si è riscontrato un limite di *Autodesk Revit* ovvero che gli elementi architettonici e strutturali che sono presenti come famiglie non sempre sono sufficienti per modellare un'opera infrastrutturale specie quando questa presenta delle geometrie articolate, come nel caso delle arcate e delle spalle del ponte in esame. In particolare, per la modellazione delle arcate sono stati fatti dei test con la maggior parte delle famiglie presenti nella libreria, ma non si è arrivati al risultato voluto. L'immagine seguente mostra la rappresentazione analitica e fisico dell'arcata modellata con diverse famiglie.

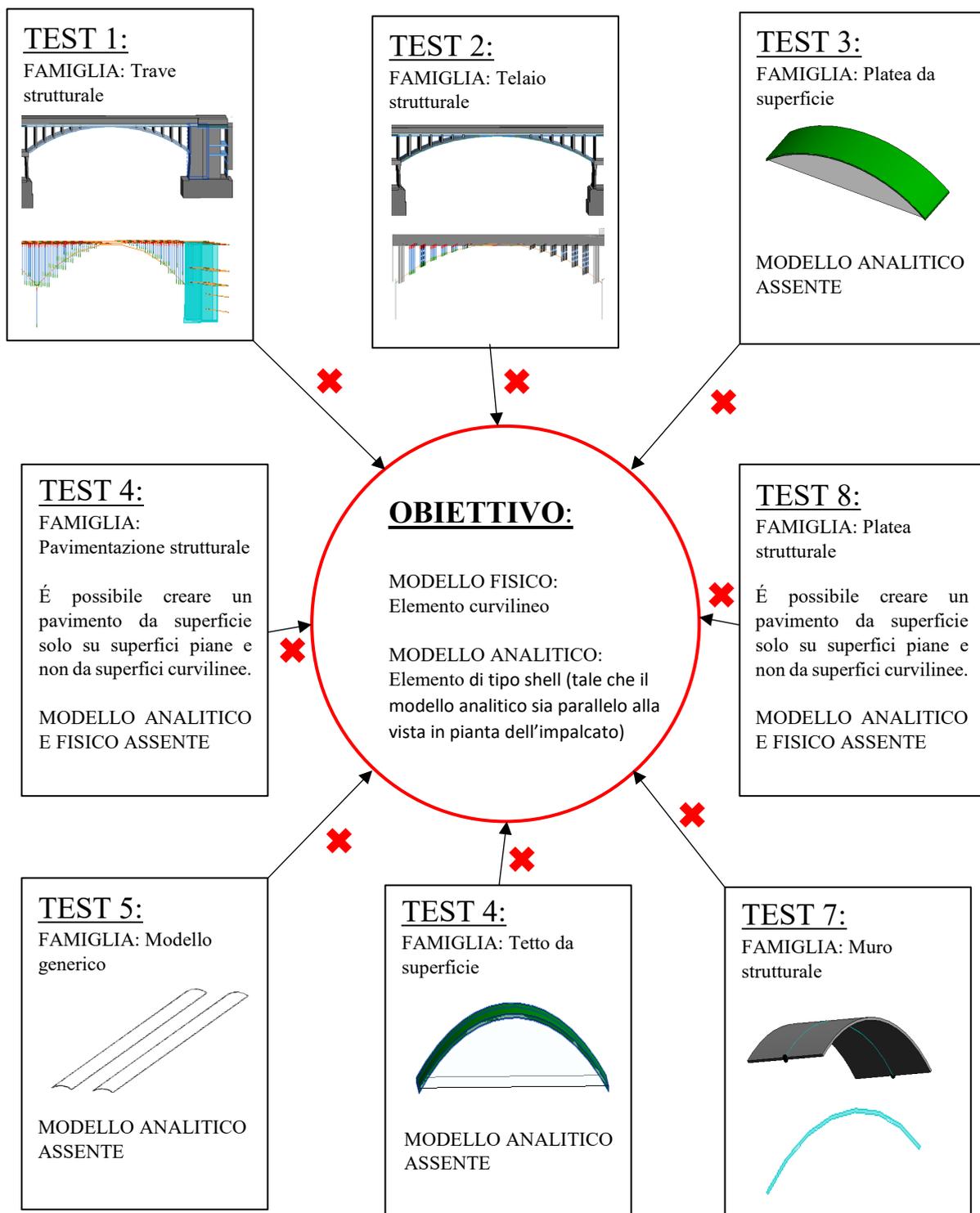


Figura 4.28: Test modellazione arcata

Capitolo 5

TEST DI INTEROPERABILITA'

TEST DI INTEROPERABILITA'

5.1 IFC

Innanzitutto, per compiere l'operazione di esportazione di un file in formato IFC da *Revit* a *SAP2000* è necessario seguire i seguenti steps:

1. Definire la configurazione IFC: per ogni categoria di *Revit* bisogna associare una classe IFC;
2. Definire la versione IFC e cliccare sul pulsante "Esporta": nella presente tesi è stata utilizzata la versione "*Coordination View 2.0*", in quanto essa offre possibilità avanzate per l'interoperabilità ai fini strutturali;
3. Importare il file IFC in *SAP2000*.

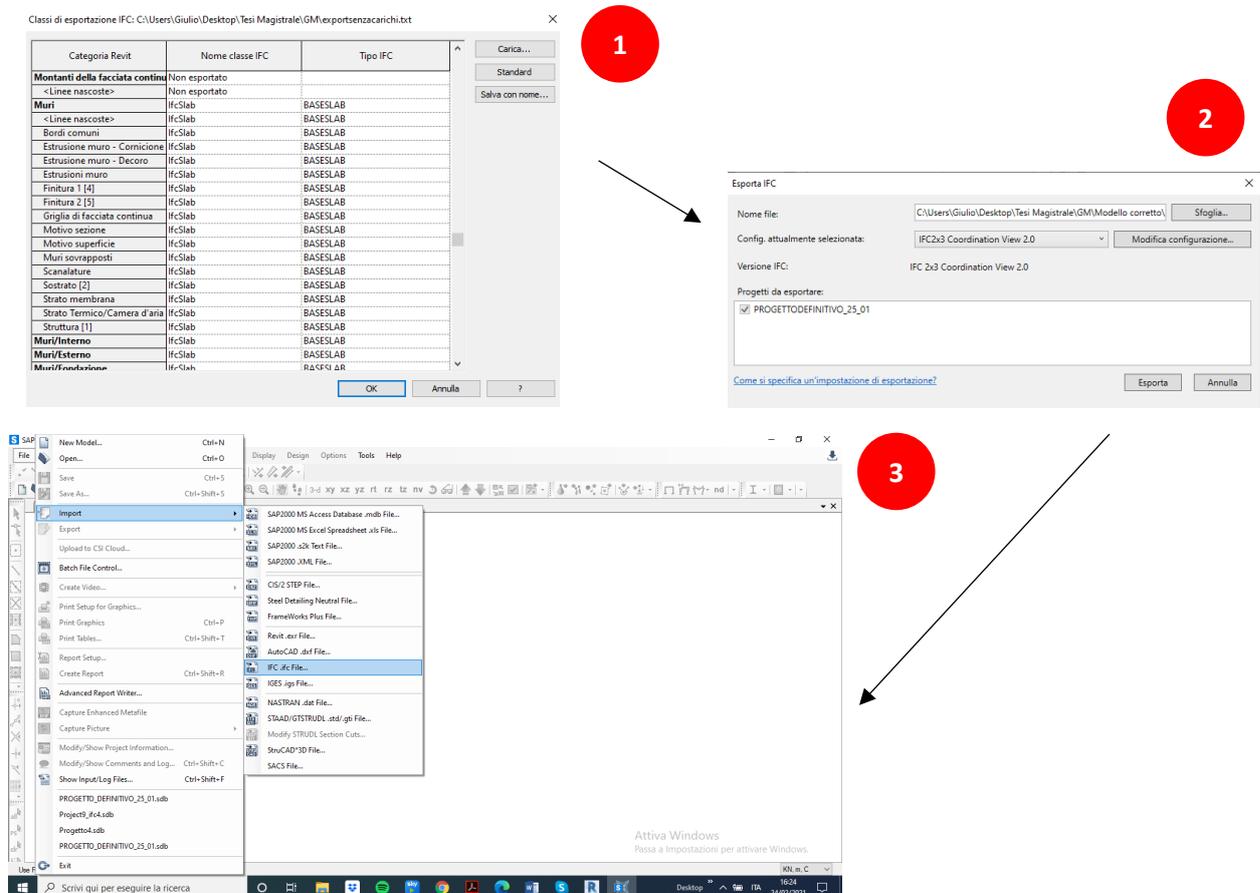


Figura 5.1: Export Revit to SAP2000 – Guida IFC

Di seguito viene riportato il risultato dell'importazione del progetto in *SAP2000*.

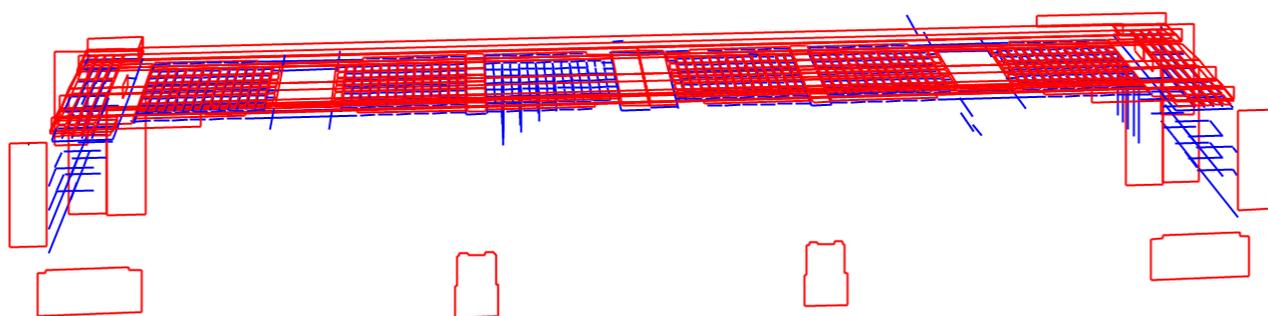


Figura 5.2: Modello completo – SAP2000 - IFC

A questo punto, compiuta l'operazione di esportazione, è stata fatta un'analisi riguardo i problemi correlati all'utilizzo di questo formato di scambio dati. I problemi possono essere dovuti a due fattori:

- È stata definita una classe IFC non corretta alla categoria di *Autodesk Revit*;
- *SAP2000* non importa quella determinata classe IFC.

Per individuare la causa della problematica è stato utilizzato un visualizzatore IFC, in particolare è stato utilizzato *BIM VISION*, questo strumento ci ha permesso di controllare se la classe definita per una determinata categoria è corretta. In caso negativo, ovvero se il visualizzatore IFC legge l'elemento in modo sbagliato, la causa è dovuta al primo fattore e quindi si è proceduti nel cambiare la classe IFC. In caso affermativo, invece, si può evincere che la causa è dovuta al secondo fattore e quindi non risolvibile.



Figura 5.3: Logo BIM Vision

In generale, sono stati fatti diversi test per capire l'errore e il problema correlato.

Analisi dei risultati

Dall'analisi del modello *SAP2000* del ponte Balbis, si può evincere che si hanno diversi problemi che rendono il modello non idoneo all'analisi strutturale.

Il primo problema evidente è legato alla posizione e geometria degli elementi strutturali. Per gli elementi lineari (quali travi e pilastri) si è persa la continuità, mentre per gli elementi bidimensionali (quali arcate e spalle) viene associata la superficie strutturale sbagliata.

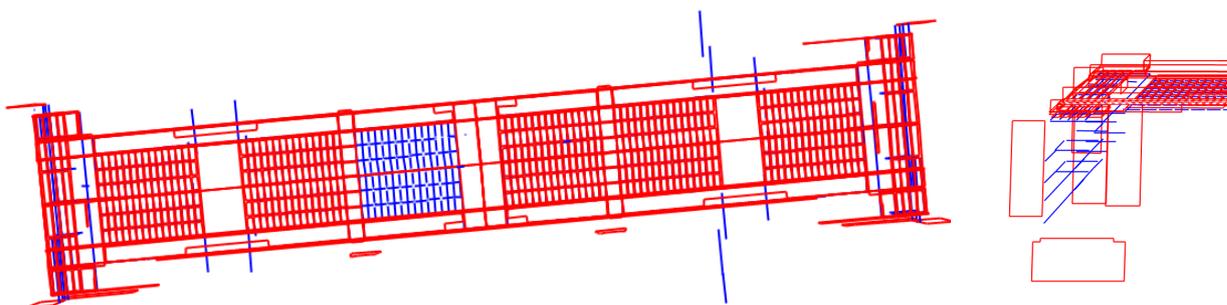


Figura 5.4: Vista standard – Posizione elementi strutturali

Continuando l'analisi del modello, se le impostazioni di vista vengono cambiate, e si analizza la vista estrusa del modello al fine di analizzare le sezioni degli elementi, è possibile notare altre anomalie. Le pile (che in *Autodesk Revit* erano state modellate con la famiglia “Pilastro strutturale” così come i pilastri di collegamento), le arcate e i pilastri delle campate laterali non vengono importate nel modello *SAP2000*, mentre gli elementi importati risultano geometricamente corretti.

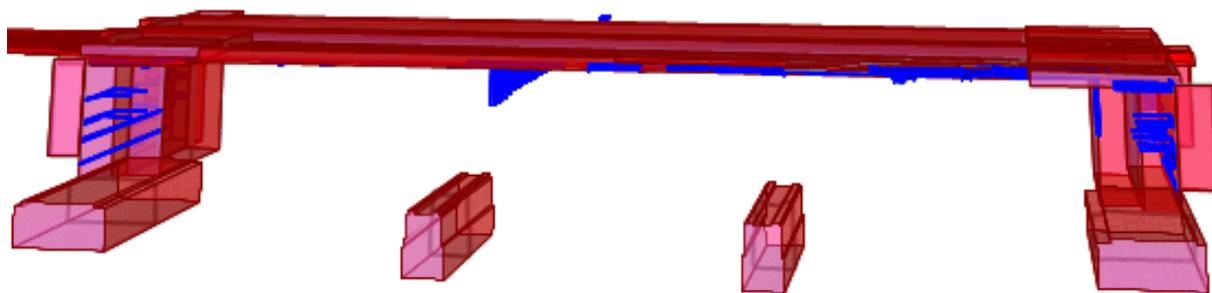


Figura 5.5: Vista estrusa - Perdita di elementi

Un altro problema che comporta ulteriori sforzi per essere risolto è relativo al materiale e le relative proprietà. Infatti, il materiale “Calcestruzzo – gettato in opera” che era stato definito in *Autodesk Revit* per tutti gli elementi che compongono il ponte viene esportato in *SAP2000* ma non viene associato agli elementi. In questo caso, il problema è facilmente risolvibile andando ad assegnare in *SAP2000* il materiale (presente nella scheda “Define” > “Materials”) a tutti gli elementi.

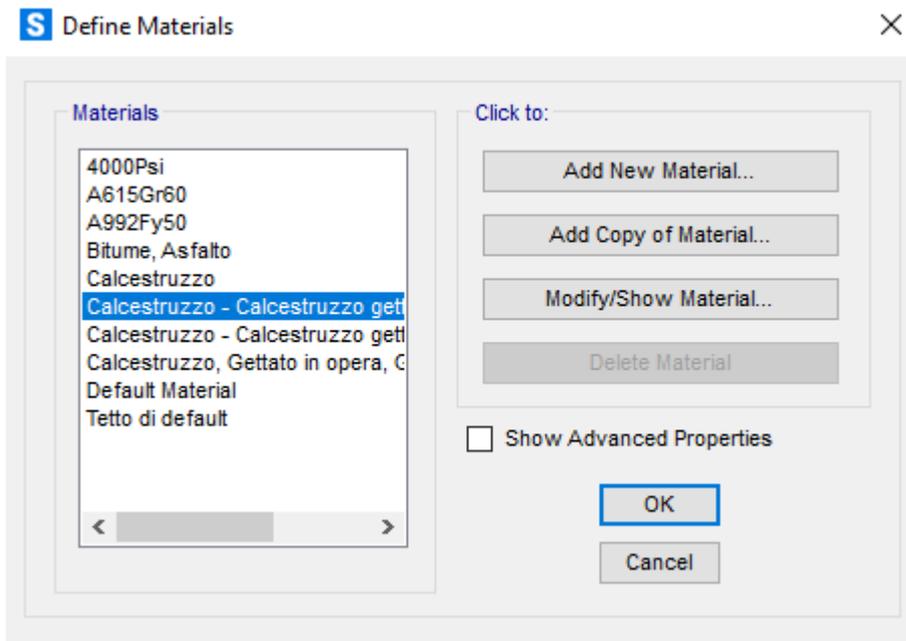


Figura 5.5: Materiale

Infine, anche i parametri che erano stati definiti in *Autodesk Revit* al fine di rappresentare lo stato di degrado dell'infrastruttura non sono stati esportati.

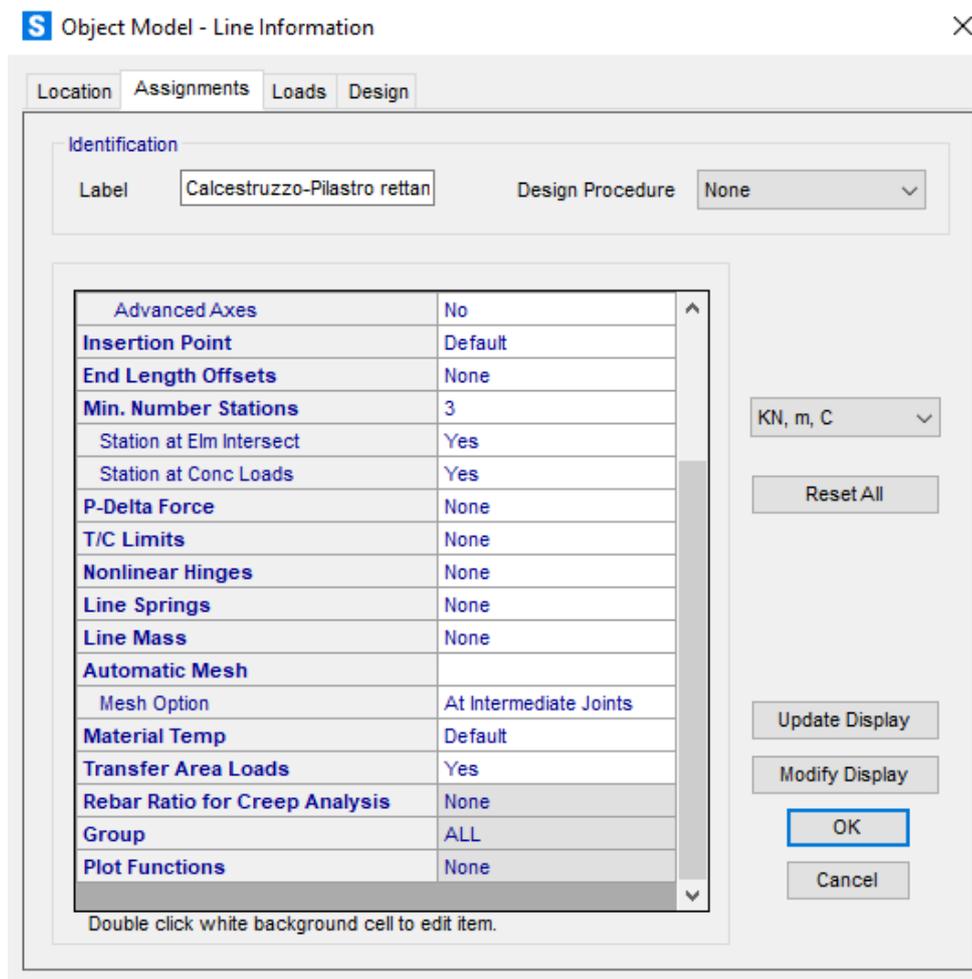


Figura 5.6: Proprietà pilastrini

A questo punto, sono stati fatti diversi test al fine di risolvere i vari problemi. In particolare, lo scopo delle prove era quello di assegnare una classe IFC in modo tale che l'elemento fosse letto correttamente in *SAP2000*, ovviamente questo non ci porta a risolvere il problema legato alla posizione spaziale degli elementi strutturali.

Di seguito viene mostrata una tabella che evidenzia i test fatti per l'arcata. La tabella è composta da quattro colonne, nella prima viene indicata la categoria *Autodesk Revit* con cui l'elemento è stato modellato, nella seconda la tipologia di classe IFC, nella terza se l'elemento viene riconosciuto correttamente in *BIM Vision* e nell'ultima viene riportato se l'elemento è importato in *SAP2000*, in caso affermativo vengono fornite eventuali restrizioni.

Categoria REVIT	Classe IFC	Import in BIM Vision	Import in SAP2000 - Restrizioni
Trave strutturale	IfcBeams		Importato, ma come un elemento di tipo trave e dritto
	IfcBuildingElementProxy		Importato, ma come un elemento di tipo trave e dritto
	IfcStructuralCurveMember		Importato, ma come un elemento di tipo trave e dritto
Muro strutturale	IfcWall		
	IfcCurtainWall		
	IfcStructuralSurfaceMember		
Tetto da superficie	IfcRoof		Importato, come un elemento di tipo shell e curvilineo, ma associato alla sezione strutturale sbagliata
	IfcPlate		
	IfcSlab		Importato, come un elemento di tipo shell, ma curvilineo e associato alla sezione strutturale sbagliata
Telaio strutturale	IfcBeams		Importato, ma come un elemento di tipo trave e dritto

	IfcStructuralCurve Member		
Modello generico	IfcBuildingElement Proxy		
	IfcBeams		Importato, ma come un elemento di tipo trave e dritto
Platea da superficie	IfcSlab		
	IfcRoof		

Tabella 5.1: Test arcata

Altri test sono stati fatti per la pila, in questo caso dato che l'elemento non veniva proprio importato in *SAP2000*, si sono fatte delle prove sia per la classe IFC che per la versione. La seguente tabella mostra i risultati ottenuti, partendo dall'elemento modellato in *Autodesk Revit* con la categoria "Pilastro strutturale metrico".

Classe IFC	Versione IFC	Import in BIM Vision	Import in SAP2000 - Restrizioni
IfcColumn	IFC 2x3 Coordination View 2.0		
IfcColumnType	IFC 2x3 Coordination View 2.0		
IfcBeam	IFC4 Design Transfer View		
IfcColumn	IFC4 Design Transfer View		

Tabella 5.2: Test pila - categoria Revit: Pilastro strutturale metrico

Come si può evincere dalle precedenti tabelle, i vari test non hanno condotto al risultato desiderato, quindi risulta ovvio che l'utilizzo di un modello di questo tipo non si presta all'analisi strutturale, o meglio implica una quasi completa rimodellazione del ponte in *SAP2000*. Sicuramente, il formato IFC necessita di importanti passi in avanti per diventare un formato di scambio dati applicabile a qualsiasi opera infrastrutturale.

5.2 Direct link: EXR

Per compiere l'operazione di esportazione di un file in formato EXR da *Revit* a *SAP2000* è necessario seguire i seguenti steps:

1. Installare il plug-in *CSIXRevit*;
2. Generare in *Revit* il file .exr;
3. Importare il file generato precedentemente in *SAP2000*.

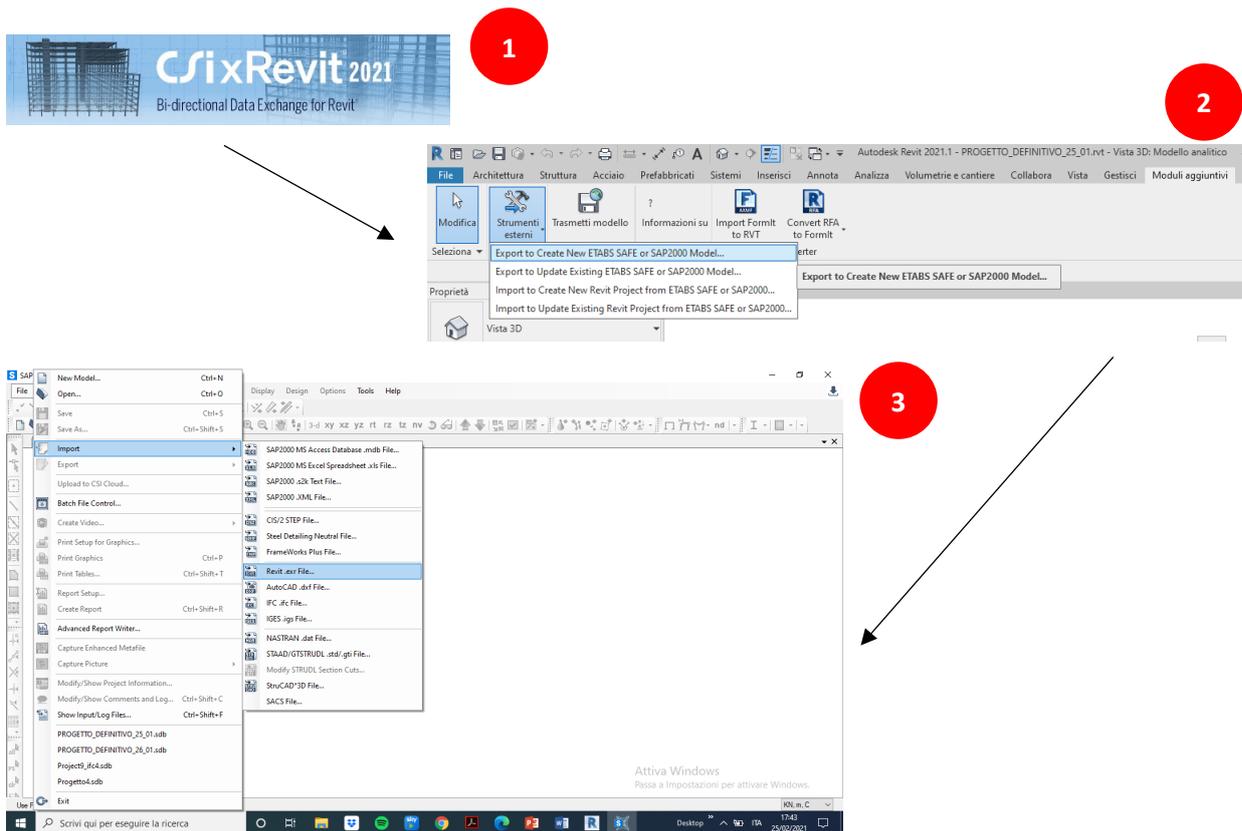


Figura 5.7: Export Revit to SAP2000 – Guida EXR

Di seguito viene riportato il risultato dell'importazione del progetto in *SAP2000*.

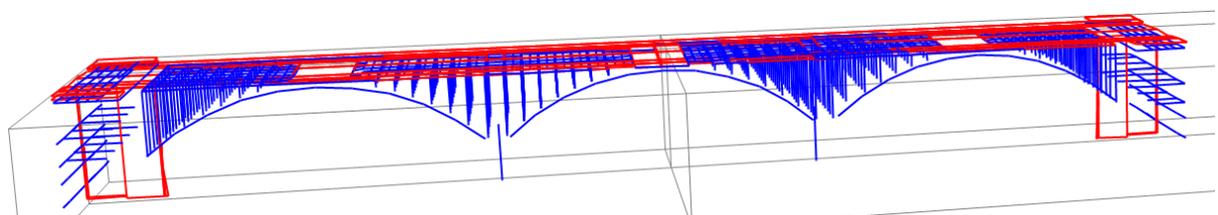


Figura 5.8: Modello completo – SAP2000 - EXR

Da subito, comparando il modello ottenuto tramite IFC con quello tramite EXR è evidente che quest'ultimo risulta migliore, in quanto non vi è il problema della perdita di alcuni elementi.

Analisi dei risultati

Un'operazione preliminare che è doverosa compiere, al fine di risolvere eventuali criticità è quella di capire come lavora il plug-in. A tale scopo, sono state fatte diverse prove sull'esportazione di singoli elementi, il risultato ottenuto è che *CSIXRevit* esporta unicamente e correttamente, sia in termini di geometria che di posizione, gli elementi analitici. Le seguenti figure mostrano il modello analitico di *Revit* e il modello strutturale di *SAP2000*.

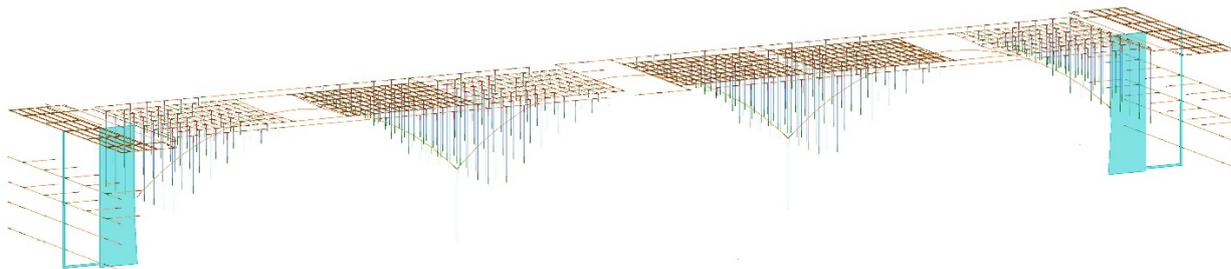


Figura 5.9: Modello analitico – Revit

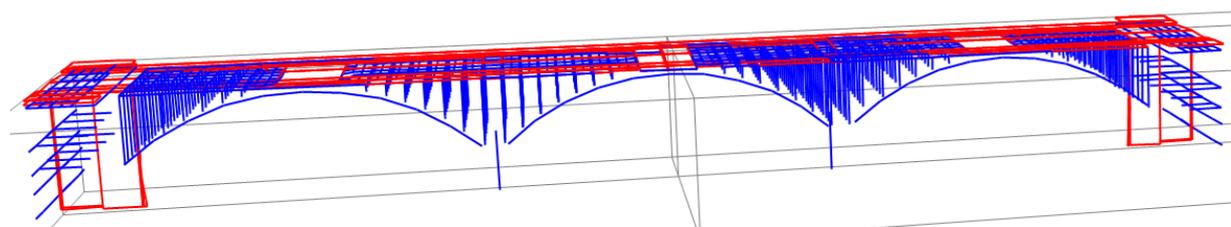


Figura 5.10: Modello strutturale – SAP2000

A prima vista, questo modello sembrerebbe idoneo all'analisi strutturale, ma analizzandolo in maniera più dettagliata, anche in questo caso si hanno delle criticità che per essere risolte è imprescindibile una ri-modellazione di alcuni elementi.

Analizzando il modello strutturale di *SAP2000*, si può notare che la posizione degli elementi strutturali è corretta, infatti si verifica la continuità tra gli elementi, ovvero si ha che gli elementi convergenti presentano un nodo comune. Questa condizione è sempre verificata, anche per la pila, il cui modello analitico era stato variato manualmente, in quanto nel caso della pila, *Autodesk Revit* associava automaticamente all'elemento fisico una rappresentazione analitica sulla faccia esterna della pila. Tale posizione dell'elemento analitico era stata variata nel baricentro della pila al fine di garantire la continuità, tale modifica viene letta da *CSIXRevit*.

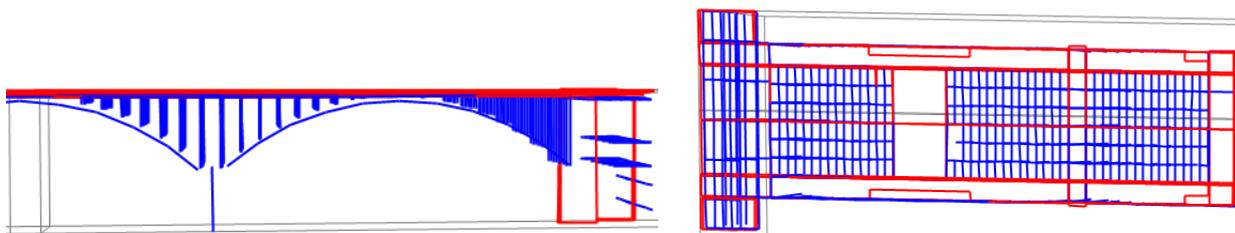


Figura 5.11: Vista standard - Posizione elementi strutturali

Se invece, le impostazioni di vista vengono cambiate e si analizza la vista estrusa del modello, al fine di controllare la geometria degli elementi, delle problematiche vengono individuate.

In particolare, gli elementi non strutturali (quali pavimentazioni, riempimento e parapetti) non vengono esportati, questo perché *CSIXRevit* esporta unicamente gli elementi analitici. Questo rappresenta un problema perché tali elementi sono essenziali al fine di definire i carichi permanenti non strutturali.

Inoltre, un'altra osservazione può essere fatta per la pila, in quanto come è possibile osservare dall'immagine seguente, l'elemento strutturale viene esportato correttamente come un elemento di tipo lineare e nella posizione corretta, ma a cui non è associata una sezione. Questo problema è dovuto alla geometria particolare della pila.

Per risolvere tali problemi l'unica strada da seguire è quella di rimodellare tali elementi in *SAP2000*.

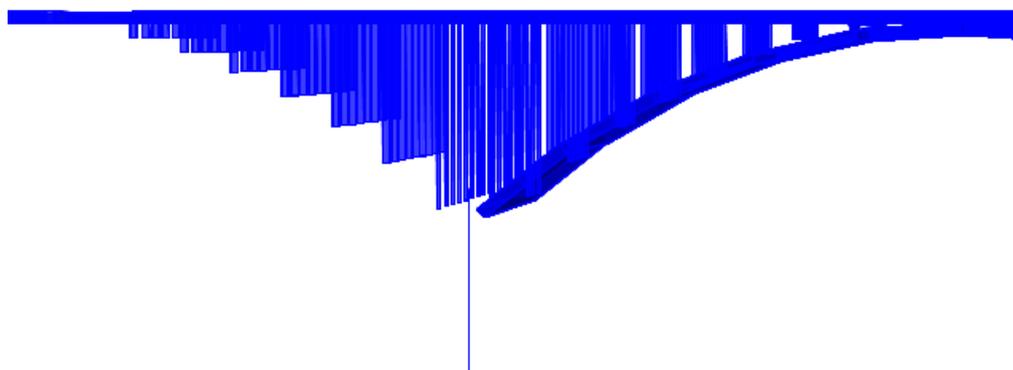


Figura 5.12: Vista estrusa - pila

Altre osservazioni possono essere fatte sulle arcate e sulle spalle. In questo caso sono state fatte delle prove al fine di valutare il risultato migliore.

L'arcata è stata modellata in *Autodesk Revit* con diverse categorie e poi esportata. In particolare si sono utilizzati le famiglie: “Muro strutturale” e “Trave strutturale”. La differenza tra queste due tipologie è che alla prima è associata una rappresentazione analitica di tipo lastra – piastra (seppur associata alla sezione sbagliata), mentre alla seconda un elemento analitico di tipo trave. Nel momento

in cui si compie l'operazione di esportazione in SAP2000 tramite formato EXR, il risultato è quello aspettato, ovvero l'elemento viene importato nel software di calcolo strutturale in modo che la rappresentazione strutturale è identica a quella analitica. Questo comporta comunque una rappresentazione sbagliata per la pila creata dalla famiglia "Muro strutturale".

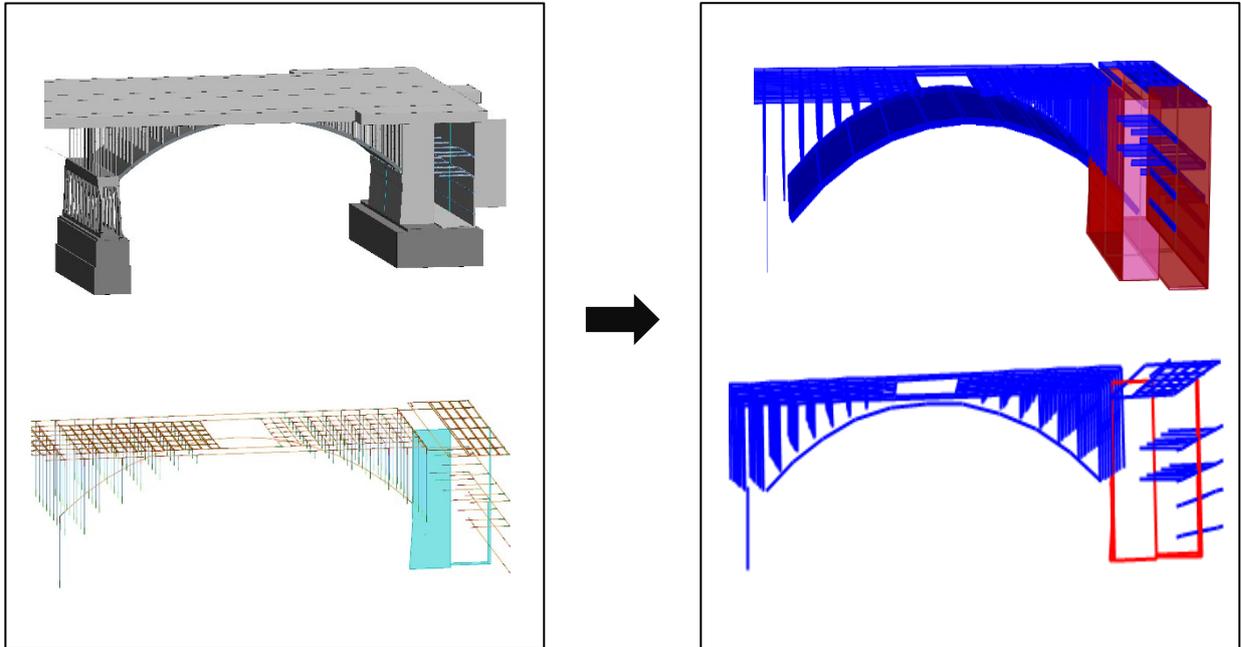


Figura 5.13: Export arcata - Famiglia: Trave strutturale

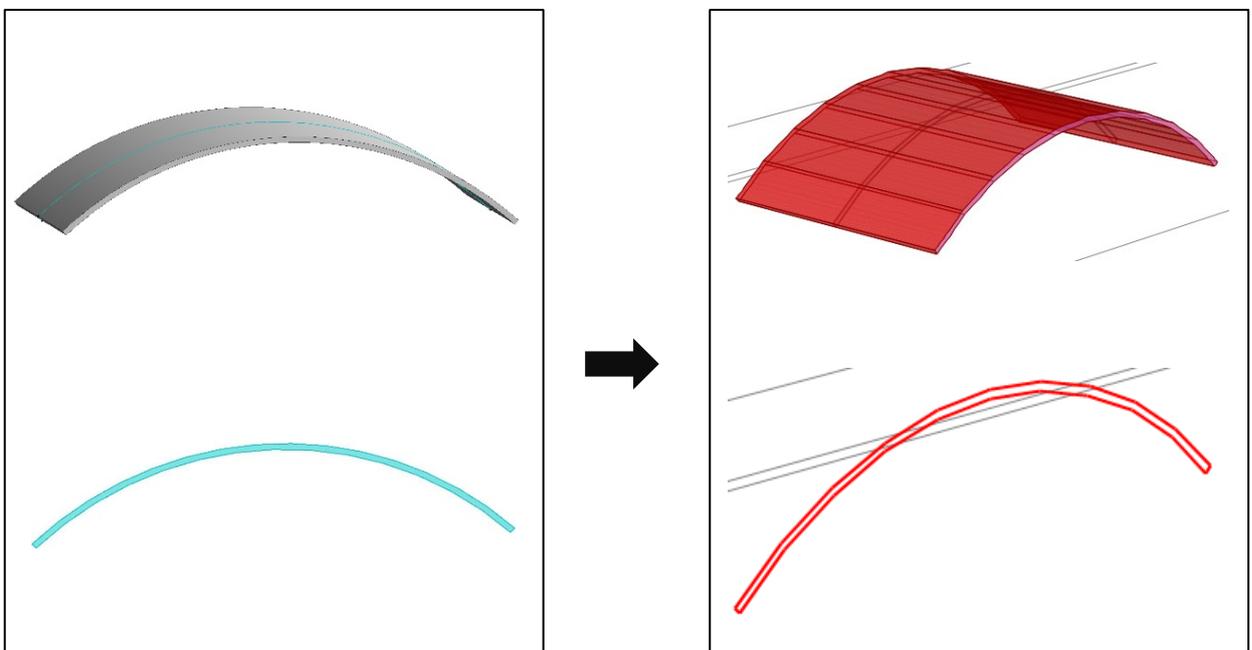


Figura 5.14: Export arcata - Famiglia: Muro strutturale

Analogo è il discorso delle spalle, di seguito viene fornita un'immagine per completezza.

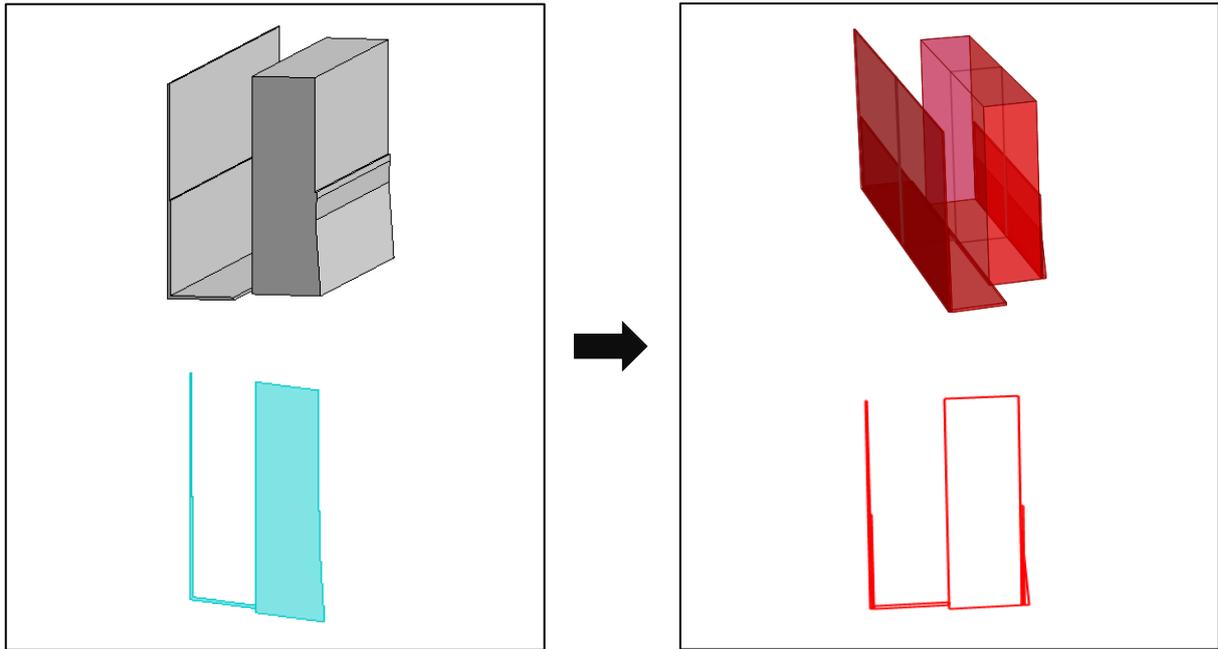


Figura 5.15: Export spalla - Famiglia: Muro strutturale

Per quanto riguarda il materiale e le relative proprietà, il formato EXR (a differenza del formato IFC) permette l'esportazione del materiale e lo definisce correttamente per tutti gli elementi. Infatti, come è possibile osservare dalle seguenti immagini, tutti gli elementi che compongono il ponte hanno associato il materiale "Calcestruzzo – gettato in opera".

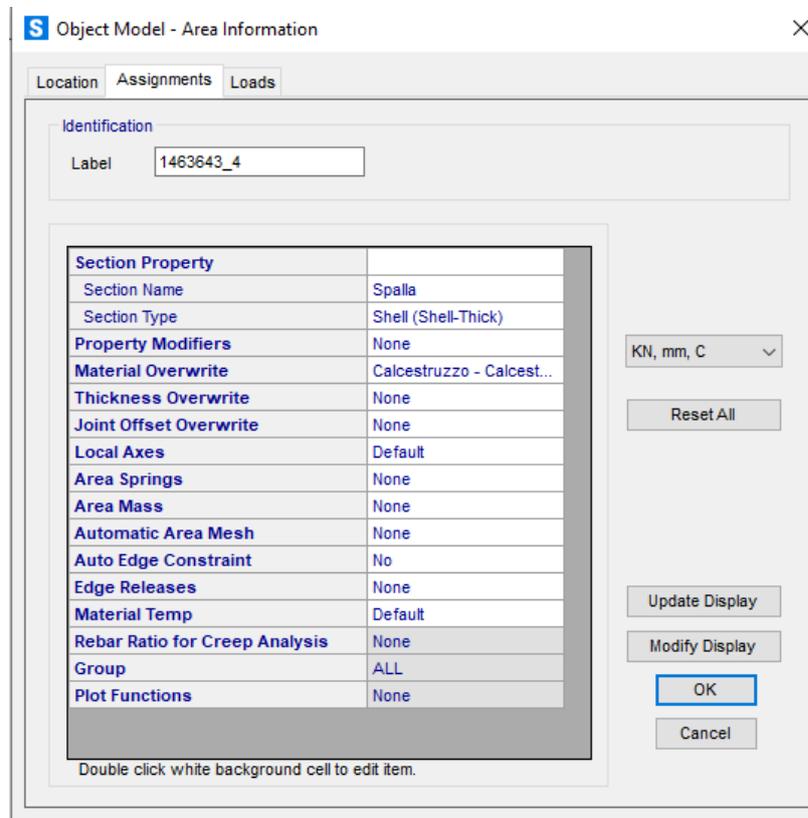


Figura 5.16: Materiale

Infine, un'ultima analisi è stata fatta al fine di valutare il livello di informazioni non grafiche presenti nel modello strutturale. Anche in questo caso, i parametri che erano stati definiti in *Autodesk Revit* al fine di rappresentare lo stato di degrado dell'infrastruttura non sono stati esportati.

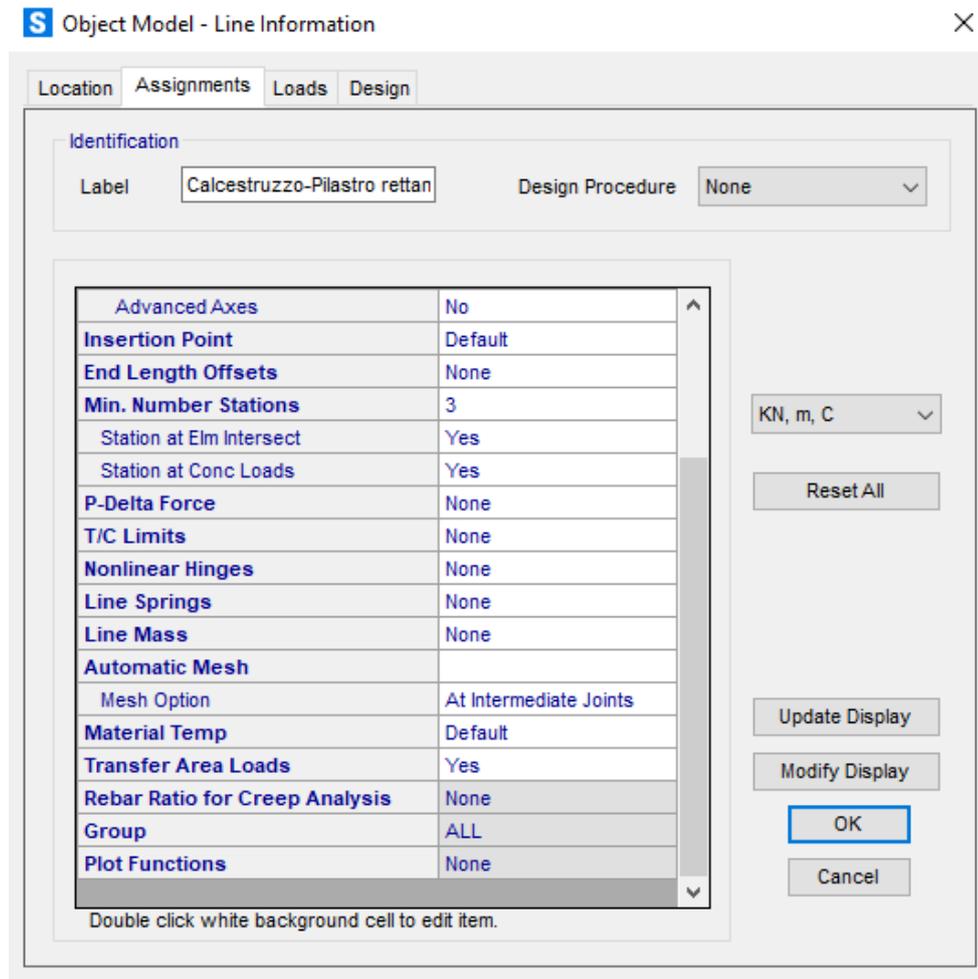


Figura 5.17: Proprietà

5.3 Comparazione dei risultati

Il presente paragrafo mostra una serie di tabelle riepilogative dei risultati ottenuti in funzione del tipo di formato di scambio dati analizzato e dei diversi punti di attenzione considerati nello studio dell'interoperabilità, il suo scopo è quello di definire il risultato migliore e fornire delle soluzioni alle criticità legate all'interoperabilità che possono compromettere la metodologia applicata.

Si spiegano nel dettaglio tutti i punti di attenzione considerati per valutare il passaggio *Revit – SAP2000*:

- Tipo di elemento strutturale: rappresenta come si vuole schematizzare l'elemento nel software di calcolo strutturale.
- Check elemento strutturale: indica se il tipo di elemento strutturale è coerente al risultato ottenuto dall'importazione del modello.
- Posizione: indica se è soddisfatta la condizione di continuità tra gli elementi convergenti all'elemento considerato.
- Geometria: considera se l'elemento fisico viene importato correttamente.
- Materiale: considera se le informazioni relative al materiale vengono importate correttamente.

Innanzitutto è doveroso ricordare che il modello ottenuto in *Autodesk Revit* e utilizzato per l'esportazione non è completamente corretto dal punto di vista analitico, in quanto non si è riusciti a modellare correttamente le arcate e le spalle del ponte.

La seguente tabella riassume i risultati ottenuti dall'esportazione del modello analitico da *Revit* e la sua importazione in *SAP2000* attraverso il formato IFC.

Elemento	Tipo elemento strutturale	Check elemento strutturale	Posizione	Geometria	Materiale
Pilastro	Trave	☑	☒	☑	☒
Trave	Trave	☑	☒	☑	☒
Fondazioni	Vincolo di incastro	☒	☒	☒	☒
Pila	Trave	Non importata			
Spalle	Lastra-piastra	☒	☒	☑	☒
Arcate	Trave	☒	☒	☒	☒
	Lastra-piastra	☒	☒	☒	☒
Pavimentazione	Trave	☒	☒	☑	☒

Riempimento impalcato	Non strutturale	✗	✗	☑	✗
Parapetto	Lastra-piastra	✗	✗	☑	✗

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva - IFC

Dall'analisi della precedente tabella è possibile evincere le enormi limitazioni legate al formato IFC, sicuramente la principale è la perdita di elementi durante l'esportazione ma se ne possono segnalare anche altre:

- Impossibilità di trasferire le condizioni di vincolo, e nel progetto *Revit* è stato imposto un vincolo di incastro per le fondazioni. Le condizioni di vincolo possono essere inserite in *SAP2000* fissando gli spostamenti dell'elemento superiore delle fondazioni, ovvero delle pile, che però in questo caso non vengono esportate.
- Impossibilità di esportare un elemento analitico di tipo lastra – piastra e curvilineo. L'unica classe IFC che permette di esportare un elemento di tipo shell è “*IFCSlab*” ma questo viene sempre letto come un elemento dritto in *SAP2000*.
- Impossibilità di esportare un elemento analitico di tipo trave e curvilineo. Infatti quando si è assegnato come classe IFC “*IfcBeam*” all'arcata modellata con la famiglia “*Trave strutturale*” il risultato ottenuto nel software di calcolo strutturale è un elemento di tipo trave e dritto.

L'unico modo per risolvere tali problematiche è quello di ri-modellare gli elementi che per vari problemi non vengono correttamente esportati. Ma, dato che questa operazione implica una quasi completa ri-modellazione del ponte si può dedurre che il formato IFC non è applicabile all'opera infrastrutturale presa in esame.

La tabella successiva mostra i risultati ottenuti dall'esportazione del modello analitico da *Revit* e la sua importazione in *SAP2000* attraverso il formato EXR.

Elemento	Tipo elemento strutturale	Check elemento strutturale	Posizione	Geometria	Materiale
Pilastro	Trave	☑	☑	☑	☑
Trave	Trave	☑	☑	☑	☑
Fondazioni	Vincolo di incastro	☑	☑	☑	☑
Pila	Trave	☑	☑	✗	☑
Spalle	Lastra-piastra	✗	✗	☑	☑
	Trave	☑	☑	☑	☑

Arcate	Trave	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Lastra-piastra	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pavimentazione	Non strutturale	Non importata			
Riempimento impalcato	Non strutturale	Non importato			
Parapetto	Non strutturale	Non importato			

Tabella 5.2: Tabella riassuntiva - EXR

Il formato EXR porta a risultati più soddisfacenti, ma anche in questo caso è necessario compiere alcune operazioni al fine di rendere il modello idoneo all'analisi strutturale. Ma a differenza del formato IFC, gli aggiustamenti necessari non influenzano l'intero workflow adottato.

La limitazione maggiore è data sicuramente dall'impossibilità di importare gli elementi non strutturale, i quali sono essenziali al fine di definire i carichi permanenti non strutturali. Inoltre, dall'analisi della precedente tabella è possibile notare che:

- Le pile vengono importate nel software di calcolo strutturale, ma non viene letta la sezione. Quindi dal punto di vista strutturale l'elemento è idoneo, sia in termini di rappresentazione che di posizione, ma non avendo informazioni riguardanti la geometria si ha una sbagliata determinazione del carico permanente strutturale associato all'elemento.
- Le arcate e le spalle, se modellate in modo tale che la loro rappresentazione strutturale è di tipo lastra – piastra risulta non corretta. Mentre, se queste vengono modellate in modo tale il loro modello strutturale è di tipo trave, si ha che gli elementi vengono importati correttamente sia dal punto di vista strutturale che fisico in *SAP2000*.
- Le condizioni di vincolo vengono trasferite correttamente.

Anche in questo caso è necessaria una ri-modellazione in *SAP2000*, che però coinvolge solamente la pavimentazione, il riempimento dell'impalcato, i parapetti, le pile, le arcate e le spalle.

Quindi si può concludere che, oggi, non è possibile ottenere un modello *Revit* che una volta esportato in *SAP2000* è completamente pronto per l'analisi strutturale.

Capitolo 6

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il presente elaborato di tesi nasce con lo scopo di testare l'interoperabilità tra software BIM e software di calcolo per quanto riguarda gli aspetti strutturali di un ponte esistente. L'applicazione della metodologia ad un caso studio reale ha permesso di riscontrare i problemi pratici dovuti all'adozione di tale metodologia. La tesi è stata sviluppata in più fasi, ognuna delle quali con un preciso obiettivo e con una analisi critica dei risultati ottenuti. In tal modo, è stato possibile definire un vero e proprio workflow metodologico che consente di gestire in maniera più diretta e completa, rispetto ad una metodologia tradizionale, una grossa mole di informazioni.

L'elaborato di tesi è stato sviluppato secondo due fasi principali. Nella prima fase, scelto il ponte Franco Balbis come caso studio e a partire dagli elaborati grafici cartacei e da un modello *Revit* del ponte è stato realizzato un nuovo modello tramite il software *Autodesk Revit*. Nel rispetto dei disegni progettuali, sono stati riprodotti tutti gli elementi strutturali e non dell'infrastruttura considerandone gli aspetti geometrici e strutturali. La seconda fase è stata incentrata nell'analisi di due formati di comunicazione tra i software *Revit* e *SAP2000*, al fine di indagare il livello di interoperabilità tra i due software. Si è cercato di sfruttare al massimo lo scambio di informazioni tra i due programmi ricercando soluzioni che fossero il più possibile automatizzabili e che minimizzassero il lavoro post esportazione. Allo stesso tempo, la creazione del modello digitalizzato del ponte Balbis si propone come un mezzo attraverso il quale è possibile tenere traccia della storiografia dell'infrastruttura e di tutti gli interventi che si susseguono nel tempo.

Al momento risulta evidente che lo stato dell'interoperabilità nel campo strutturale sembra essere in una fase embrionale, dove si intravedono i presupposti per un'esportazione del modello sul software di calcolo in modo tale da limitare al minimo le operazioni nella fase di post-esportazione. Sono presenti ancora dei limiti, che potrebbero essere risolti con l'implementazione di alcune funzionalità dei software BIM e dei software di calcolo strutturale.

Il risultato finale della tesi è un database tridimensionale del caso studio che potrà essere la base di partenza per studi futuri, come ad esempio l'implementazione del livello di informazione del modello attraverso la modellazione delle armature, del terreno e le azioni che gravano sull'opera.

In conclusione, nonostante le varie criticità riscontrate, si può affermare che la metodologia BIM in ambito infrastrutturale, ed in particolare nell'ambito della

progettazione di infrastrutture viarie, può essere considerata un'ottima metodologia in grado sia di ridurre le tempistiche di progettazione sia di migliorare la qualità stessa della progettazione sia essa preliminare, definitiva o esecutiva. Per tale motivo, in prospettiva futura risulta molto importante una migliore implementazione dei software soprattutto in termini interoperabilità tra gli stessi. I limiti riscontrati saranno oggetto di ricerche e sviluppi futuri. Infatti, il fine ultimo delle ricerche future sarà quello di raggiungere un processo perfettamente informatizzato e interoperabile per ciò che concerne la progettazione in BIM di un'infrastruttura viaria.

BIBLIOGRAFIA

AIA. (2013). *Building Information Modeling Protocol Form.*

ANAS. (2019). *Quaderni tecnici.*

Città Metropolitana di Torino. (2013). *Analisi strutturale della situazione attuale.*

Città Metropolitana di Torino. (2013). *Relazione di calcolo.*

Città Metropolitana di Torino.. (2013). *Rilievo strutturale .*

Coghe M. (2020). *Il BIM per le infrastrutture, Concetti di base e sviluppi applicativi futuri.*

Dalla Mora T., Peron F., Cappelletti F., Romagnoni P., Ruggieri P. (2014). *Una panoramica sul BIM .*

Dalla Mora T., Peron F., Cappelletti F., Romagnoni P., Ruggieri P. (2014). *Una panoramica sul Building Information Modeling.*

Eatsman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. (2016). *Il BIM guida completa al Building Information Modeling per committenti, architetti, ingegneri, gestori immobiliari e imprese.*

Masciarelli S., (2020.). *La digitalizzazione delle infrastrutture esistenti con metodologia BIM: il caso del ponte Franco Balbis.*

Osello A. (2012). *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti.*

Osello A. (2019). *InfraBIM: il BIM per le infrastrutture.*

Tatjana Vilutienė, E. Š. (2020). BIM APPLICATION IN INFRASTRUCTURE PROJECT. *THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE ENGINEERING.*

SITOGRAFIA

Acca. (2021). Tratto da <http://biblus.acca.it/bim-e-ifc-linteroperabilita-tra-i-software-e-ilbuildingsmart-international/>.

Autodesk. (2021). Tratto da <https://www.autodesk.com/software/revit/>.

Bentley. (2021). Tratto da <https://www.bentley.com/>.

Bentley. (2021). Tratto da <https://www.bentley.com/it/products/>.

Bimportale. (2021). Tratto da <https://www.bimportale.com/progetti/infrabim/>

Bimportale. (2021). Tratto da <https://www.bimportale.com/progetti/>.

Buildingsmart. (2021). Tratto da <https://www.buildingsmart.org/>.

Buildingsmart.(2021). Tratto da <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC2x3/FINAL/HTML/ifcstructuralelementsdomain/content.htm>.

Buildingsmart. (2021). Tratto da <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC2x3/FINAL/HTML/>.

Buildingsmart. (2021). Tratto da <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>.

Csiamerica. (2021). Tratto da <https://www.csiamerica.com/>.

Csiamerica. (2021). Tratto da <https://www.csiamerica.com/products/csixrevit>.

Edilportale. (2021). Tratto da <https://www.edilportale.com/software/bim-cad-e-rendering/1243>.

Ingenio web. (2021). Tratto da <https://www.ingenio-web.it/26668-le-n-dimensioni-dellinfrabim-programmazione-temporale-analisi-dei-costi-e-progettazione-antincendio>.

01Building. (2021). Tratto da <https://www.01building.it/bim/infrabim-infrastrutture/>.

RINGRAZIAMENTI

La conclusione di questa tesi implica anche la conclusione di un percorso, il quale non sarebbe stato possibile senza l'aiuto di tante persone che vorrei ringraziare.

Grazie alla mia famiglia per il costante sostegno, per aver sempre creduto in me e non avermi mai fatto mancare nulla.

Grazie a mia nonna Rocchina per l'affetto che ogni giorno mi dimostra.

Grazie ai miei amici semplicemente per essere quello che sono, una seconda famiglia.

Grazie a tutte le persone con cui ho condiviso questo percorso, che inconsapevolmente mi hanno lasciato qualcosa, ognuno di voi è stato fondamentale per non farmi pesare questi anni di studio.

Grazie a tutte le persone che hanno creduto in me.

Giulio